

**Implementación de una práctica de laboratorio numérico-experimental incluyendo materiales sostenibles en el tema de flexión para la asignatura Diseño de Hormigón Armado I**

**Jhoan Sebastian Ospina Alvarez**

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

**Luis Eduardo Zapata Orduz**

Ingeniero Civil, PhD

Codirector

**David Sebastian Cotes Prieto**

Ingeniero Civil, MSc

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2025**

### **Dedicatoria**

*A el altísimo, por sostenerme cuando mis fuerzas fallaban. A mi madre, quien es el pilar de mi vida. A mi pareja, por su apoyo y compañía incondicional, y a mis maestros, por su paciencia, lecciones y guiarme en cada paso.*

### **Agradecimientos**

A mi madre, por su amor incondicional, su fortaleza inquebrantable y por enseñarme con su ejemplo que los sueños se alcanzan con esfuerzo, constancia y fe. Su apoyo ha sido mi mayor impulso en los momentos más difíciles y su confianza en mí ha sido la base de cada logro.

A mi pareja, por estar a mi lado con paciencia, comprensión y motivación. Gracias por acompañarme en cada paso y por brindarme serenidad en medio del cansancio y las exigencias del camino.

A mi director, el profesor Luis Eduardo Zapata Orduz, por su compromiso con la enseñanza y su papel como formador de profesionales y seres humanos, por creer y confiar en mí y el apoyo académico y administrativo. Cada clase, consejo y corrección fue una oportunidad para crecer y superarme.

A mi codirector, el profesor David Sebastian Cotes Prieto, por su paciencia y guía desde los inicios de mi carrera, y por acompañarme nuevamente en esta etapa final con el mismo compromiso y claridad que lo caracterizan.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	12
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo General .....	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Metodología .....	19
2.1 Fase Experimental.....	19
2.1.1. Mezcla Preliminar y Preparación de la Actividad .....	19
2.1.2. Jornadas de Mezcla y Fabricación de Vigas .....	22
2.1.3. Ensayos de Compresión y Flexión en el Laboratorio .....	27
2.2 Fase de Análisis Numérico .....	29
2.3 Evaluación de la Experiencia de Laboratorio .....	32
2.3.1 Actividad Computacional .....	32
2.3.2 Actividad Experimental .....	33
2.3.3 Calificación de Actividades .....	33
2.4 Encuestas de Percepción a Estudiantes.....	35
2.4.1 Encuesta Pre-Laboratorio.....	35
2.4.2 Encuesta Post-Laboratorio.....	36
3. Resultados y discusión.....	41
3.1 Ensayos de Laboratorio.....	41
3.1.1 Ensayos de Compresión y Determinación de $f'_{cm}$ .....	41
3.1.2 Ensayos de Flexión en Vigas .....	43

3.2 Encuesta Pre-Laboratorio.....	47
3.3 Encuesta Post-Laboratorio .....	50
3.3.1 Componente Relacionado con ABET SO-5 .....	50
3.3.2 Componente Relacionado con ABET SO-6 .....	52
3.3.3 Componente Relacionado con ABET SO-2 .....	55
3.3.4 Respuestas Abiertas .....	58
3.4 Calificaciones.....	61
4. Conclusiones .....	63
5. Recomendaciones .....	64
Referencias Bibliográficas .....	66
Apéndices.....	71

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Cantidades obtenidas por método ACI 211.1-22 para ambos tipos de mezcla.</i> .....	20
Tabla 2. <i>Programación de horarios e identificación de grupos para las jornadas de mezcla. En paréntesis se indica el curso al que pertenecen.</i> .....	23
Tabla 3. <i>Preguntas formuladas en la encuesta previa a la actividad.</i> .....	36
Tabla 4. <i>Preguntas formuladas en la encuesta post-laboratorio.</i> .....	37
Tabla 5. <i>Preguntas abiertas de la encuesta post-laboratorio.</i> .....	39
Tabla 6. <i>Promedio y desviación estándar de la encuesta pre-laboratorio.</i> .....	48
Tabla 7. <i>Promedio y desviación estándar para preguntas relacionadas con ABET SO-5.</i> .....	51
Tabla 8. <i>Promedio y desviación estándar para preguntas relacionadas con ABET SO-6.</i> .....	53
Tabla 9. <i>Promedio y desviación estándar para preguntas relacionadas con ABET SO-2.</i> .....	56
Tabla 10. <i>Respuestas abiertas por parte de los estudiantes a la encuesta post-laboratorio.</i> .....	58

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Preparación de mezcladora, formaletas y área de trabajo.</i> .....	21
Figura 2. <i>Despiece de vigas ensayadas, medidas en milímetros.</i> .....	22
Figura 3. <i>Estudiantes realizando la dosificación de materiales y la colocación de la armadura de refuerzo en la formaleta.</i> .....	24
Figura 4. <i>Refuerzo de las vigas tipo I con distanciadores para recubrimiento y socialización sobre la armadura de refuerzo.</i> .....	24
Figura 5. <i>Proceso de mezclado en la mezcladora mecánica.</i> .....	25
Figura 6. <i>Vaciado del concreto en las formaletas.</i> .....	26
Figura 7. <i>Vigas y cilindros en proceso de curado.</i> .....	26
Figura 8. <i>Jornadas de ensayos a compresión con los estudiantes.</i> .....	27
Figura 9. <i>Jornadas de ensayo a flexión con los estudiantes y montaje del experimento.</i> .....	28
Figura 10. <i>Desarrollo de la primera sesión teórica (3 de marzo).</i> .....	30
Figura 11. <i>Diagrama de momento-curvatura del ejemplo solucionado durante la primera sesión teórica.</i> .....	30
Figura 12. <i>Desarrollo de la segunda sesión teórica (4 de marzo).</i> .....	31
Figura 13. <i>Ejercicio de la actividad computacional.</i> .....	32
Figura 14. <i>Rúbrica de evaluación para los conceptos y temática del curso.</i> .....	34
Figura 15. <i>Rúbrica de calificación para el desarrollo del entregable.</i> .....	34
Figura 16. <i>Primer ensayo de compresión realizado por el grupo C.</i> .....	41
Figura 17. <i>Predicción de resistencia de la mezcla del grupo C.</i> .....	42

Figura 18. <i>Curva de evolución resistencia grupo C (C-FA) y A (C-PC)</i> .....	42
Figura 19. <i>Inicio del agrietamiento por flexión</i> .....	44
Figura 20. <i>Viga del grupo A después del ensayo</i> .....	44
Figura 21. <i>Viga A gráfica desplazamiento-carga</i> .....	45
Figura 22. <i>Socialización sobre el tipo de falla por cortante y tensión diagonal para complementar la actividad</i> .....	46
Figura 23. <i>Resultados de la encuesta pre-laboratorio</i> .....	47
Figura 24. <i>Respuestas relacionadas con ABET SO-5 (preguntas 1-5 de la Tabla 4)</i> .....	51
Figura 25. <i>Respuestas relacionadas con ABET SO-6 (respuestas 6 a 11 de la Tabla 4)</i> .....	53
Figura 26. <i>Respuestas relacionadas con ABET SO-2 (preguntas 12 a 16 de la Tabla 4)</i> .....	56
Figura 27. <i>Notas definitivas de la práctica de laboratorio</i> .....	62

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Guía de laboratorio y video explicativo como material de apoyo .....	71
Apéndice B. Sesión de análisis numérico-computacional .....	74
Apéndice C. Enunciado de actividad computacional .....	75
Apéndice D. Enunciado de actividad práctica .....	77

## Resumen

**Título:** Implementación de una práctica de laboratorio numérico-experimental incluyendo materiales sostenibles en el tema de flexión para la asignatura Diseño de Hormigón Armado I\*

**Autor:** Jhoan Sebastian Ospina Alvarez\*\*

**Palabras Clave:** Vigas en concreto reforzado, laboratorio, trabajo experimental, sostenibilidad, pedagogía.

**Descripción:** Este trabajo de grado tuvo como objetivo diseñar e implementar una experiencia pedagógica en el laboratorio de estructuras orientada a reforzar la comprensión conceptual del comportamiento de vigas de concreto reforzado a través del trabajo experimental, incorporando además el uso de materiales sostenibles como alternativa al cemento tradicional. La intervención incluyó el diseño de mezclas, construcción y ensayo de vigas con falla sub-reforzada y sobre-reforzada, complementado con clases teóricas sobre análisis sección-momento curvatura y modelación computacional. Se promovió el aprendizaje activo mediante la participación de los estudiantes en la elaboración de las vigas y el registro de datos durante los ensayos. Adicionalmente, se aplicaron encuestas antes y después de la práctica, cuyos resultados permitieron evaluar las percepciones estudiantiles en torno al trabajo en equipo y al desarrollo de habilidades analíticas y experimentales. Los resultados muestran una alta valoración de la actividad, tanto en su impacto en la comprensión teórico-práctica como en el fortalecimiento del criterio técnico, destacando además el interés generado por la viabilidad de materiales sostenibles sin comprometer el desempeño estructural observado en laboratorio. Finalmente, se identificaron aspectos de mejora relacionados con la programación de las jornadas experimentales y el detallado del refuerzo transversal, destacando la importancia de una planificación pedagógica rigurosa para maximizar el beneficio de este tipo de estrategias. Se concluye que la implementación de experiencias de laboratorio puede contribuir significativamente a la integración entre la teoría y su aplicación experimental.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Doctor en Ingeniería Civil. Codirector: David Sebastian Cotes Prieto. Magister en Ingeniería Civil.

### Abstract

**Title:** Implementation of a Numerical-Experimental Laboratory Practice Including Sustainable Materials in the Topic of Flexural Behavior for the course Design of Reinforced Concrete I.\*

**Author(s):** Jhoan Sebastian Ospina Alvarez\*\*

**Key Words:** Beams in reinforced concrete, laboratory, experimental work, sustainability, pedagogy.

**Description:** The present work aimed to design and implement a pedagogical experience in the structural laboratory focused on reinforcing the conceptual understanding of the behavior of reinforced concrete beams through experimental work, also incorporating the use of sustainable materials as an alternative to traditional cement. The intervention included the design of concrete mixes, construction, and testing of under-reinforced and over-reinforced beams, complemented by theoretical lessons on section moment-curvature analysis and computational modeling. Active learning was promoted through student participation in beam fabrication and data collection during the tests. Additionally, pre- and post-practice surveys were conducted, whose results allowed for the evaluation of student perceptions regarding teamwork and the development of analytical and experimental skills. The results show a high appreciation for the activity, both in its impact on theoretical-practical understanding and in the strengthening of technical judgment, also highlighting the interest generated by the feasibility of sustainable materials without compromising the structural performance observed in the laboratory. Finally, areas for improvement were identified, related to the scheduling of experimental sessions and the detailing of transverse reinforcement, emphasizing the importance of rigorous pedagogical planning to maximize the benefit of this type of strategy. It is concluded that the implementation of laboratory experiences can significantly contribute to the integration between theory and its experimental application.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical and mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Civil Engineering Doctor. Codirector: David Sebastian Cotes Prieto. Master in Civil Engineering.

## Introducción

El concreto reforzado es uno de los materiales más empleados en la ingeniería civil contemporánea, debido a su versatilidad, resistencia y costo relativamente bajo (McCormac & Brown, 2018). Este material combina las propiedades de compresión del concreto con la ductilidad y resistencia en tracción del acero de refuerzo, permitiendo así la construcción de elementos estructurales capaces de resistir diversas sollicitaciones. Entre dichos elementos, las vigas desempeñan un papel fundamental en la transmisión de cargas dentro de sistemas estructurales. Su diseño y análisis constituyen un componente esencial en la formación de los futuros ingenieros civiles (Cleary, 2006).

En la Universidad Industrial de Santander (UIS) (Universidad Industrial de Santander, 2024), la asignatura de Diseño de Hormigón Armado I representa un primer acercamiento formal de los estudiantes al diseño de elementos estructurales en concreto reforzado. Con relación a esta y otras asignaturas similares de ingeniería civil, diversos autores han identificado que para ofrecer una experiencia de aprendizaje más completa es beneficioso: (i) acoplar la enseñanza de las partes teórica y experimental, promoviendo una comprensión más profunda de los conceptos al permitir que los estudiantes relacionen directamente el contenido estudiado en clase con su aplicación en laboratorio (Hadgraft & Kolmos, 2020), (ii) capacitar a los estudiantes en el uso de herramientas computacionales para el análisis seccional, facilitando la interpretación y validación de los resultados experimentales mediante simulaciones numéricas (Begliardo et al., 2008) (Romero & Museros, 2012), lo cual no solo refuerza la comprensión de los fenómenos físicos, sino que también los familiariza con tecnologías ampliamente utilizadas en la práctica profesional mediante

el manejo de Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs), permitiéndoles contrastar los modelos simplificados propuestos por los reglamentos de diseño y construcción con simulaciones más precisas de los fenómenos físicos, y (iii) fomentar la conciencia ambiental en los estudiantes mediante la reflexión sobre el impacto del uso de materiales alternativos al concreto tradicional, promoviendo prácticas sostenibles dentro del laboratorio y el análisis crítico de alternativas constructivas que reduzcan la huella ecológica de las estructuras (Kudva P. et al., 2024).

La necesidad de articular de forma efectiva los componentes teóricos y experimentales en la enseñanza del diseño estructural ha sido ampliamente estudiada por diversos autores, resaltando su impacto positivo en la formación de competencias prácticas y cognitivas (Hale et al., 2007). Diversos estudios han evidenciado que la falta de integración entre los conocimientos teóricos y las experiencias prácticas en la educación en ingeniería puede limitar el desarrollo de competencias complejas, dificultando la aplicación efectiva de principios técnicos en contextos reales (Van den Beemt et al., 2020). Teniendo esto en cuenta, la integración de experiencias de laboratorio con el contenido teórico permite que los estudiantes visualicen en tiempo real el comportamiento del concreto reforzado, contrasten sus predicciones con los resultados experimentales y comprendan de manera más profunda conceptos como la distribución de esfuerzos, la fisuración, la ductilidad y la falla estructural (o el inicio de esta). Esta sinergia metodológica no solo mejora el rendimiento académico, sino que también promueve un aprendizaje significativo y contextualizado, alineado con las demandas actuales de la enseñanza en ingeniería civil (Dymond, 2020).

En complemento a la integración teórico-práctica, la formación en el uso de herramientas computacionales para el análisis seccional de miembros de concreto reforzado se consolida como

un componente beneficioso en la preparación de ingenieros civiles. Estas herramientas, que permiten simular el comportamiento de elementos estructurales, ofrecen una vía efectiva para contrastar los resultados teóricos con los obtenidos experimentalmente (Begliardo et al., 2008). Su implementación en el entorno académico no solo facilita la comprensión de fenómenos complejos como la distribución de esfuerzos y la respuesta no lineal de materiales, sino que también familiariza a los estudiantes con tecnologías comúnmente empleadas en la ingeniería estructural moderna. De igual forma, el uso pedagógico de TICs ha sido promovido como una estrategia eficaz para desarrollar habilidades digitales, fomentar la autonomía en el aprendizaje y reducir la brecha entre la academia y el ejercicio práctico (Guerra-Macías & Tobón, 2025).

Adicionalmente, fomentar la conciencia ambiental en la formación de ingenieros civiles se ha convertido en una prioridad ante los crecientes desafíos del cambio climático. El concreto tradicional, ampliamente utilizado en la industria de la construcción, genera un considerable impacto ambiental debido a las emisiones asociadas con la producción de cemento, las cuales representan aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, siendo el 90% de estas generadas durante el proceso de calcinación y producción del Clinker (Pérez Jácome, 2021). Por ello, es fundamental que los estudiantes comprendan no solo las propiedades estructurales de los materiales, sino también su huella ecológica y el papel que juegan en la sostenibilidad de las infraestructuras. La incorporación de prácticas de laboratorio que contemplen el uso de materiales alternativos como adiciones minerales, concretos reciclados o sustituciones parciales del cemento, permite reflexionar críticamente sobre la viabilidad estructural, económica y ambiental de estos insumos. Estas experiencias no solo promueven el análisis comparativo basado en evidencia experimental, sino que además alinean la formación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

(ODS) propuestos por las Naciones Unidas, especialmente en lo relacionado con la producción y consumo responsable (ODS 12) y la construcción de infraestructuras resilientes y sostenibles (ODS 9 y 11) (United Nations, 2015). De este modo, se cultiva una ética profesional fundamentada en la responsabilidad ambiental, coherente con las competencias definidas por organismos como la Junta de Acreditación de Ingeniería y Tecnología (ABET, por sus siglas en inglés) (ABET, 2021), que destacan la importancia de abordar problemas técnicos desde una perspectiva ética, sostenible y socialmente responsable (United Nations, 2015).

Todo lo anterior se alinea con las competencias fundamentales definidas por el ABET, y se puede evidenciar en dos de los siete resultados de aprendizaje formulados los cuales corresponden al SO-2 (“la capacidad de aplicar diseño de ingeniería para producir soluciones que satisfagan necesidades específicas con consideración de salud pública, seguridad y bienestar, así como factores globales, culturales, sociales, ambientales y económicos”), SO-5 (“la capacidad de funcionar eficazmente en un equipo cuyos miembros juntos brindan liderazgo, crean un entorno colaborativo e inclusivo, establecen metas, planifican tareas y cumplen objetivos”) y SO-6 (“la capacidad de desarrollar y llevar a cabo la experimentación apropiada, analizar e interpretar datos, y usar el juicio de ingeniería para sacar conclusiones”) (ABET, 2021).

A partir de revisión de literatura, se ha identificado que la implementación de una práctica de laboratorio orientada a la revisión, construcción y ensayo de vigas constituye una estrategia pedagógica para fortalecer la comprensión conceptual a través del aprendizaje experimental (Warren Plugge, 2023) (Hadgraft & Kolmos, 2020). Este tipo de experiencias permite a los estudiantes visualizar directamente el comportamiento estructural de los elementos que diseñan,

facilitando una conexión más profunda entre los conceptos teóricos y su aplicación en escenarios reales. Por ejemplo, Hale et al. en la Universidad de Arkansas, implementaron una experiencia de laboratorio en la que los estudiantes participaron activamente en la fabricación y ensayo de vigas, con el objetivo de ilustrar diferentes modos de falla (Hale et al., 2007). A través de encuestas se identificó que esta práctica fortaleció su comprensión del proceso constructivo, el armado de refuerzo y la conexión entre diseño teórico y ejecución práctica. De manera similar, en la United States Military Academy, Estes y Klosky en 2002 (Estes & Klosky, 2002) integraron actividades experimentales en el curso de diseño estructural, permitiendo a los estudiantes desarrollar habilidades en la interpretación de resultados, la validación de modelos teóricos y el diseño de experimentos. Asimismo, Dymond en 2020 (Dymond, 2020) propuso una metodología de enseñanza basada en un proyecto semestral que abarcaba el diseño, la construcción y la prueba de vigas de concreto reforzado. Aunque demandante en tiempo y recursos, esta estrategia demostró un alto impacto en la motivación y el aprendizaje de los estudiantes, especialmente en la comprensión de las diferencias entre idealización teórica y comportamiento real. En todos los casos, las experiencias implementadas demostraron mejoras en la motivación, el aprendizaje activo y el desarrollo de competencias técnicas fundamentales en el ejercicio profesional de la ingeniería civil.

Para contribuir al desarrollo de las competencias anteriormente mencionadas, el presente proyecto implementó una práctica de laboratorio en el marco de la asignatura de Diseño de Hormigón Armado I (código 24100 de la Universidad Industrial de Santander), orientada al análisis, construcción y ensayo de vigas de concreto reforzado con diferentes condiciones de reforzamiento de acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes

(NSR-10) (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010) (sub-reforzado y sobre-reforzado). Como complemento, se integraron sesiones de modelado computacional en el software SAP2000 v24.1.0 (Computers and Structures, 2024), permitiendo a los estudiantes contrastar los resultados experimentales con simulaciones numéricas. Además, se incorporó en parte de las mezclas el uso de materiales cementantes sostenibles, como la ceniza volante, con el fin de introducir conceptos de sostenibilidad en la formación estructural, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (United Nations, 2015).

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Implementar una práctica de laboratorio en la asignatura de Diseño de Hormigón Armado I (código 24100 de la Universidad Industrial de Santander) que integre el ensayo experimental de vigas de concreto reforzado y análisis computacional, con la finalidad de aplicar los conceptos del tema de flexión.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Orientar la fabricación y ensayo de vigas de concreto utilizando tanto materiales tradicionales como alternativos, para que los estudiantes analicen y comparen su respuesta seccional bajo condiciones de carga reales.
- Impartir clases de modelado de vigas de concreto reforzado por medio de un software comercial de análisis estructural con el fin de complementar la clase teórica de la asignatura.
- Evaluar la percepción de los estudiantes sobre la experiencia mediante el uso de encuestas y análisis de estadística descriptiva, con el fin de establecer el impacto de la experiencia y proporcionar una base para futuros estudios relacionados.

## **2. Metodología**

La práctica de laboratorio se implementó en 2 cursos de la asignatura Diseño de Hormigón Armado I (código 24100 - UIS) a cargo del profesor Luis Eduardo Zapata Orduz en el primer semestre académico del año 2025, comprendido entre el 3 de febrero y el 30 de mayo del mismo año. El grupo F1 tiene 28 estudiantes matriculados y el G1 tiene 27 matriculados. La calificación obtenida en las actividades de esta práctica hizo parte del 10% de la calificación de la asignatura, sin embargo, la participación en las jornadas de fabricación de los especímenes fue de carácter voluntario y con requisito obligatorio de la póliza de accidentes estudiantil. La temática abordada en las actividades calificativas de esta práctica se desarrolló en las clases impartidas por el docente (teoría moderna de la flexión y teoría de cortante y tensión diagonal).

### **2.1 Fase Experimental**

#### **2.1.1. Mezcla Preliminar y Preparación de la Actividad**

La fase inicial del componente experimental consistió en la adquisición y caracterización de los materiales disponibles, con el fin de establecer las condiciones necesarias para el diseño de mezcla del concreto a utilizar. Para ello, se realizaron ensayos de granulometría tanto al agregado fino como al agregado grueso, establecidos por la norma ASTM C33/C33M (ASTM International, 2024b). Así mismo, se determinaron el contenido de humedad superficial y la absorción de ambos

agregados mediante los procedimientos estandarizados (ASTM C566 para humedad y ASTM C128 para absorción) (ASTM International, 2019) (ASTM International, 2022b).

Con base en estos resultados, se formularon dos mezclas preliminares para concreto con resistencia objetivo de 21 [MPa] a los 28 días, mediante el método del ACI 211.1-22 (American Concrete Institute, 2022), con el cual se determinaron las cantidades por metro cúbico de concreto las cuales se muestran en Tabla 1. La primera correspondió a un concreto tradicional con cemento Portland ordinario (C-PC) como único material cementante, mientras que la segunda incorporó un reemplazo parcial del 5 % del cemento por ceniza volante (C-FA), este último, con el fin de evaluar el comportamiento mecánico de un material con propiedades potencialmente más sostenibles.

**Tabla 1.**

*Cantidades obtenidas por método ACI 211.1-22 para ambos tipos de mezcla.*

Mezcla	Cantidades por m <sup>3</sup>				
	Agua [kg]	Cemento [kg]	Agregado grueso 3/4" [kg]	Agregado fino [kg]	Ceniza volante [kg]
<b>C-PC</b>	213.58	386.92	936.00	806.99	0.00
<b>C-FA</b>	213.58	367.57	936.00	806.99	19.35

Paralelamente, se hizo el inventario de los materiales disponibles en el laboratorio, tales como formaletas, armaduras de refuerzo y el área de trabajo para realizar la mezcla con los estudiantes como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1.**

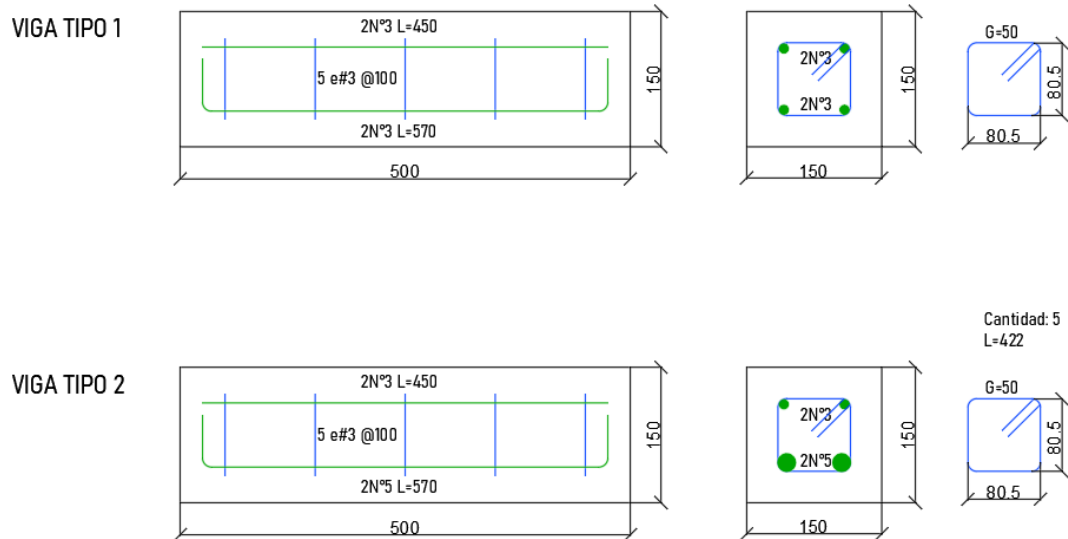
*Preparación de mezcladora, formaletas y área de trabajo.*



El diseño de las vigas fue realizado por el autor de este proyecto, en coordinación y guía por el director y codirector de este proyecto, con el objetivo de inducir dos modos de falla por momento flector: una viga sub-reforzada (viga tipo 1) y otra sobre-reforzada (viga tipo 2), las cuales representan modos de falla controlados por tracción y compresión, respectivamente. Para este fin, se emplearon los principios de análisis de sección rectangular en flexión pura, según lo establecido en la norma sismo-resistente de Colombia (NSR-10) (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010). La sección transversal seleccionada para todas las vigas fue de 150 [mm]  $\times$  150 [mm] y una longitud de 500 [mm] como se muestra en la Figura 2. Tales dimensiones se estimaron teniendo en cuenta la capacidad del laboratorio, esto es, el elemento de acero para apoyo y carga que se utilizará en los ensayos.

**Figura 2.**

*Despiece de vigas ensayadas, medidas en milímetros.*



Una vez definido el diseño de mezcla y de vigas, se fabricaron unas mezclas preliminares en el laboratorio, con el fin de verificar su trabajabilidad y resistencia a compresión. Verificadas las propiedades de los concretos, se elaboró una guía de laboratorio y un video explicativo como material de apoyo para los estudiantes (Apéndice A), los cuales incluyen instrucciones detalladas sobre la dosificación, secuencia de mezclado, verificación de materiales, elaboración de vigas y cilindros, y medidas de seguridad.

### 2.1.2. Jornadas de Mezcla y Fabricación de Vigas

Se organizaron las jornadas de mezcla en el laboratorio con la participación de los estudiantes, participaron 40 de 56 estudiantes en total (más del 70%). Siguiendo las indicaciones de la guía de laboratorio, los estudiantes conformaron grupos de cinco a ocho integrantes y

seleccionaron un horario fuera del tiempo de clase que se ajustara a su disponibilidad. Las franjas habilitadas fueron de 11:00 a. m. a 1:00 p.m. y de 1:00 p.m. a 3:00 p. m., distribuidas durante cuatro días, la programación de horarios definitivos para la actividad de muestra en la Tabla 2 y se desarrolló en la semana del lunes 7 de abril al viernes 11 de abril.

**Tabla 2.**

*Programación de horarios e identificación de grupos para las jornadas de mezcla. En paréntesis se indica el curso al que pertenecen.*

<b>Hora</b>	<b>Lunes</b>	<b>Martes</b>	<b>Miércoles</b>	<b>Jueves</b>	<b>Viernes</b>
<b>11:00 a.m. - 1:00 p.m.</b>	Grupo A (F1)	-	Grupo C (G1)	Grupo E (G1)	Grupo G (G1)
<b>1:00 p.m. - 3:00 p.m.</b>	Grupo B (F1)	-	Grupo D (F1)	Grupo F (F1)	Grupo H (G1)

Días previos a las jornadas de mezcla, se publicó en el aula virtual del curso (Universidad Industrial de Santander, 2025) la guía de laboratorio y el video explicativo de la práctica, recursos que fueron de gran importancia para que los estudiantes prepararan la actividad. Adicionalmente se solicitó la póliza de accidentes de aquellos estudiantes que desearan participar en las jornadas. La participación durante éstas fue de carácter voluntario, pero con requisito obligatorio de la póliza de accidentes. Se estableció un mínimo de 3 estudiantes participantes por grupo de trabajo para llevar a cabo la actividad.

Como muestra la Figura 3, cada grupo inició su jornada con la dosificación de materiales y la colocación de la armadura de refuerzo en el interior de la formaleta de las vigas, de acuerdo con el diseño correspondiente a cada tipo de viga (sub-reforzada o sobre-reforzada). Al momento

de la colocación del refuerzo en las formaletas, se apoyó sobre 4 distanciadores de 30 [mm] equitativamente distribuidos para garantizar el recubrimiento de concreto y se socializó sobre la armadura de refuerzo con los estudiantes, esto se evidencia en la Figura 4.

### Figura 3.

*Estudiantes realizando la dosificación de materiales y la colocación de la armadura de refuerzo en la formaleta.*



### Figura 4.

*Refuerzo de las vigas tipo 1 con distanciadores para recubrimiento y socialización sobre la armadura de refuerzo.*



Se realizó el proceso de mezclado en una mezcladora de potencia 150 [W] y capacidad 120 [kg] (aproximadamente 50 [l] de concreto), siguiendo el procedimiento sugerido en la guía de laboratorio, el cual se rige en la secuencia indicada en C192/C192M (ASTM International, 2024a), como se muestra en la Figura 5. Una vez obtenida la mezcla, se evaluó su consistencia mediante el ensayo de asentamiento, siguiendo la norma ASTM C143/C143M (ASTM International, 2020). Posteriormente, se elaboraron cuatro cilindros de  $100 \times 200$  [mm] y una viga de  $150$  [mm]  $\times$   $150$  [mm] y una longitud de 500 [mm], moldeados en tres capas e intervenidas según el procedimiento descrito en la norma ASTM C31/C31M (ASTM International, 2025), tal como se observa en la Figura 6. Los especímenes se desmoldaron aproximadamente 20 horas después de fabricados, se marcaron con su respectivo grupo y se situaron en la cámara de curado húmedo hasta el día de ensayo correspondiente (Figura 7).

### Figura 5.

*Proceso de mezclado en la mezcladora mecánica.*



**Figura 6.**

*Vaciado del concreto en las formaletas.*

**Figura 7.**

*Vigas y cilindros en proceso de curado.*



### 2.1.3. Ensayos de Compresión y Flexión en el Laboratorio

Estos especímenes fueron curados en condiciones de inmersión total y ensayados a compresión a edades diferentes. Siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C39/C39M (ASTM International, 2024c), se llevó a cabo el ensayo a compresión en cilindros con los estudiantes, como se muestra en la Figura 8.

#### Figura 8.

*Jornadas de ensayos a compresión con los estudiantes.*



Estos ensayos se llevaron a cabo a edades diferentes en cada grupo, sin embargo, se usó el modelo de desarrollo de la resistencia propuesto por el fib Model Code 2010 (Fédération Internationale du Béton, 2010) para proyectar la resistencia del concreto a los 28 días de manera temprana. Esto se hizo con el objetivo de facilitar el desarrollo y estructuración del informe presentado por los estudiantes con suficiente antelación. La fórmula del modelo se muestra en la ecuación (1) (Fédération Internationale du Béton, 2010).

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}$$
$$\beta_{cc}(t) = e^{s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{0.5} \right]}$$
(1)

Donde  $f_{cm}(t)$  es la resistencia media a la compresión en [MPa] a una edad de  $t$  en días,  $f_{cm}$  es la resistencia media a la compresión en [MPa] a una edad de 28 días,  $\beta_{cc}(t)$  es una función para describir el desarrollo de la resistencia con el tiempo,  $t$  es la edad del concreto en días ajustada y  $s$  es un coeficiente que depende de la clase de resistencia del cemento.

Transcurridos 28 días desde la fabricación de las vigas, se coordinó con cada grupo de estudiantes un horario determinado para ejecutar el ensayo de estas, el cual se llevó a cabo según lo establecido en la norma ASTM C78/C78M (ASTM International, 2022a), consistiendo en un ensayo de flexión de cuatro puntos como lo muestra la Figura 9.

### Figura 9.

*Jornadas de ensayo a flexión con los estudiantes y montaje del experimento.*



Los estudiantes participaron activamente en la experiencia, registrando hallazgos cualitativos, como el modo de falla, la aparición y propagación de grietas, así como datos cuantitativos, observando la evolución del diagrama carga-desplazamiento y obteniendo la carga última alcanzada durante el proceso. Estos ensayos se llevaron a cabo durante la semana 13 del semestre académico, comprendida entre el 5 y el 9 de mayo, la asistencia fue voluntaria, pero estableciendo un mínimo de 1 integrante por grupo de trabajo para la toma de datos experimentales, sin embargo, se contó con una amplia asistencia de 31 estudiantes sobre 56 matriculados.

## **2.2 Fase de Análisis Numérico**

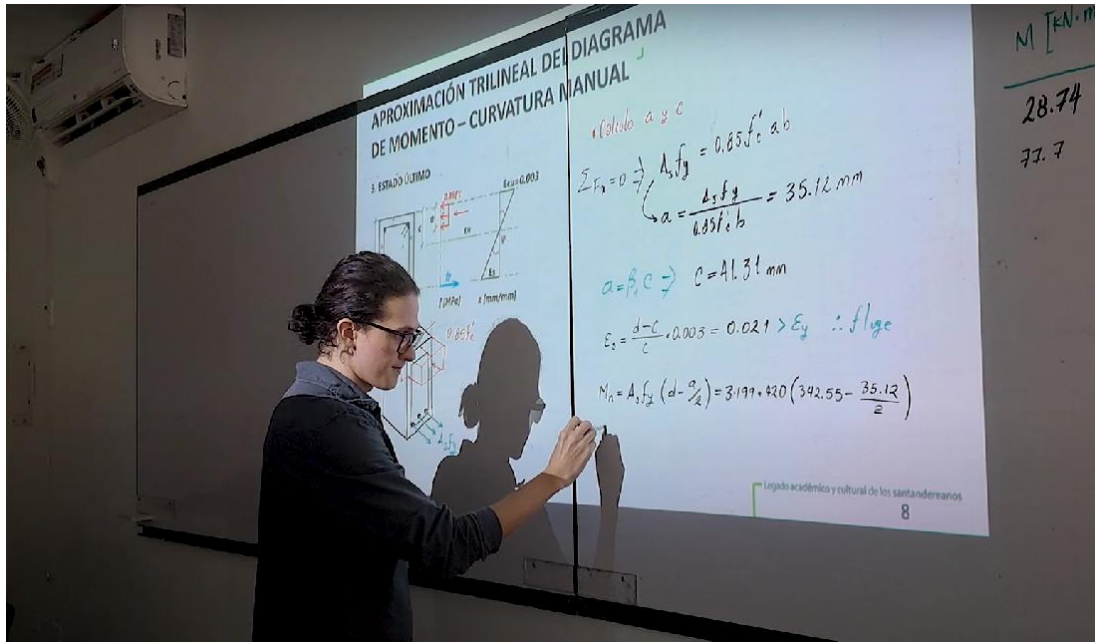
La fase teórica del laboratorio se desarrolló mediante clases sincrónicas de análisis numérico, con una duración de dos horas durante los días 3 y 4 de marzo. Estas sesiones, realizadas dentro del horario regular del curso, tuvieron como propósito reforzar el tema de flexión y análisis seccional en vigas de concreto reforzado, como se muestra en la Figura 10.

Durante las clases, se realizó el análisis detallado de una sección transversal, abordando los tres estados principales: estado elástico no agrietado, elástico agrietado y estado último. A partir de este análisis, se construyó manualmente el diagrama momento-curvatura, relacionando el comportamiento seccional con la resistencia del concreto y el acero. Posteriormente, se utilizó el software SAP2000 v.24.1.0 (Computers and Structures, 2024) para modelar computacionalmente la misma sección y generar su correspondiente diagrama momento-curvatura (Figura 11) con el fin de comparar los resultados teóricos con los obtenidos de manera computacional. Esta clase fue

grabada y compartida con los estudiantes, y su enlace se encuentra en el Apéndice B del presente documento.

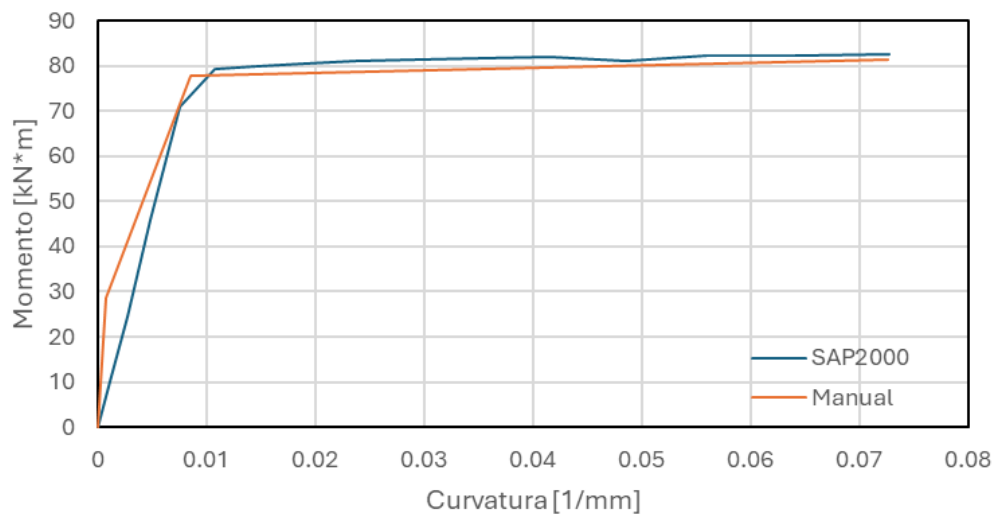
### Figura 10.

*Desarrollo de la primera sesión teórica (3 de marzo).*



### Figura 11.

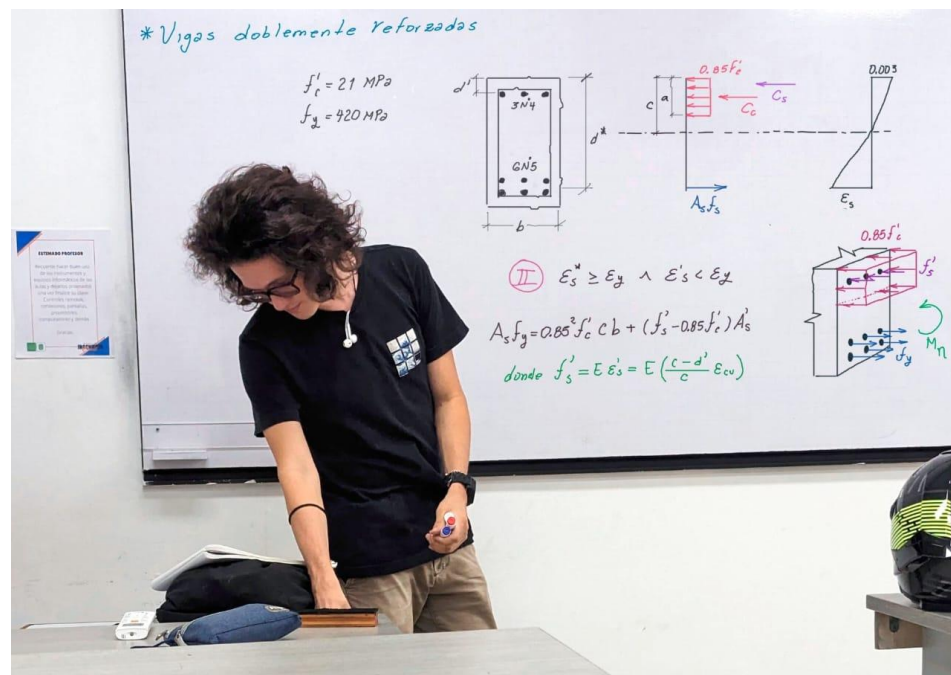
*Diagrama de momento-curvatura del ejemplo solucionado durante la primera sesión teórica.*



En la sesión posterior, se abordó con mayor profundidad el estado último en secciones doblemente reforzadas con el objetivo de enfatizar los criterios de diseño estructural aplicados en vigas de concreto reforzado, como se puede observar en la Figura 12. A partir de este enfoque, se explicó el procedimiento para determinar la capacidad última de secciones que incluyen refuerzo a compresión, destacando su importancia en situaciones donde se requiere aumentar la ductilidad o reducir las dimensiones del elemento estructural (McCormac & Brown, 2018). Durante esta sesión, se desarrollaron ejemplos numéricos aplicando el método de análisis por equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones, tal como se establece en los códigos de diseño estructural (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

### Figura 12.

*Desarrollo de la segunda sesión teórica (4 de marzo).*



## 2.3 Evaluación de la Experiencia de Laboratorio

Con el fin de evaluar la experiencia de laboratorio, se diseñaron dos actividades orientadas al enfoque computacional y experimental, las cuales tenían un valor del 3% y 7% de la calificación de la asignatura, respectivamente, para un total del 10% de valor para la práctica de laboratorio.

### 2.3.1 Actividad Computacional

Para evaluar el componente computacional, se diseñó una actividad sobre la temática impartida en primera sesión de la cuarta semana del semestre académico (Figura 13). Esta consistía en un ejercicio similar al desarrollado durante la sesión que debía ser abordado de manera manual y computacional, el documento correspondiente a esta actividad se encuentra en el Apéndice C del presente documento. El tiempo de entrega establecido para esta actividad fue de una semana.

#### Figura 13.

##### *Ejercicio de la actividad computacional*

**FASE COMPUTACIONAL (3% DEL LABORATORIO)**

En este documento se encuentran los parámetros para realizar el análisis seccional de una viga de concreto reforzado, para lo cual, usted deberá realizar el diagrama de momento curvatura mediante su idealización trilineal de manera manual y posteriormente hacer uso del Section Designer del software SAP2000 para obtener el diagrama de momento-curvatura de manera computacional.

En la figura 1 se muestra la sección transversal de una viga de concreto reforzado, la cual está construida con concreto reforzado de  $f'_c = 21 \text{ MPa}$  y acero grado 420, estribos N°3, recubrimiento mínimo para vigas de concreto construido en sitio según NSR-10. Asuma módulo de elasticidad según NSR-10 para agregado mixto y módulo para el acero de refuerzo  $E_s = 200 \text{ GPa}$ .

*Acero constructivo*

*Estribo N°3*

*4N°6*

300

400

### **2.3.2 Actividad Experimental**

Para evaluar el componente experimental se diseñó un enunciado con el fin de integrar el componente práctico y computacional impartidos durante el laboratorio. Como producto de esta actividad, los estudiantes entregaron un informe en formato PDF con el desarrollo completo de la práctica, incluyendo cálculos manuales, modelado numérico en SAP2000 y análisis comparativo de resultados del experimento. El documento correspondiente a esta actividad se encuentra en el Apéndice D del presente informe.

### **2.3.3 Calificación de Actividades**

Los entregables de ambas actividades se enviaron por medio del aula virtual del curso (Universidad Industrial de Santander, 2025), y para su calificación se hizo uso de las rúbricas mostradas en la Figura 14 y la Figura 15. La Figura 14 evalúa el dominio de los conceptos y temáticas desarrolladas en la asignatura, considerando aspectos como la coherencia en la aplicación del marco teórico, la interpretación de resultados y la argumentación basada en normativa NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010). Por otra parte, Figura 15 se enfoca en el cumplimiento formal del documento, valorando la organización del contenido, la claridad en la presentación escrita, la correcta estructuración del informe y el uso adecuado de tablas, figuras y referencias.

**Figura 14.**

*Rúbrica de evaluación para los conceptos y temática del curso.*

		<b>Evaluación</b>		
<b>ítem</b>		<b>Descripción</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Nota</b>
<b>Diseño de Hormigón Armado I</b>	<b>Flexión</b>	Análisis y desarrollo correcto del tema de flexión, aplicando las temáticas impartidas en el curso.	15%	
	<b>Corte y Tensión Diagonal</b>	Análisis y desarrollo correcto del tema de cortante, aplicando las temáticas impartidas en el curso.	15%	
	<b>Unidades</b>	Se presenta un proceso con uso adecuado de unidades.	10%	
	<b>Resultado</b>	Las respuestas presentadas son correctas y acordes con los datos experimentales y teóricos correspondientes al grupo.	10%	

**Figura 15.**

*Rúbrica de calificación para el desarrollo del entregable.*

		<b>Evaluación</b>		
<b>ítem</b>		<b>Descripción</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Nota</b>
<b>Desarrollo del Laboratorio</b>	<b>Descripción del problema</b>	Se espera una explicación clara y contextualizada del problema que aborda la práctica.	15%	
	<b>Metodología</b>	Debe incluir una descripción ordenada de las fases del trabajo: mezcla, fabricación, curado, modelado, ensayo y análisis.	15%	
	<b>Resultados y discusión</b>	Se espera una comparación crítica entre los resultados y una discusión que explique las diferencias o similitudes encontradas.	10%	
	<b>Conclusiones</b>	Resumir los principales hallazgos y aprendizajes del laboratorio, conectando los resultados con los conceptos teóricos del curso.	10%	

## **2.4 Encuestas de Percepción a Estudiantes**

Con el objetivo de evaluar el impacto pedagógico de la experiencia desarrollada, se diseñaron y aplicaron dos encuestas a los estudiantes participantes: una previa y otra posterior al laboratorio. Ambas se implementaron a través de la plataforma Microsoft Forms (Microsoft, 2025) y utilizaron una escala de calificación tipo Likert de cinco niveles para medir el grado de acuerdo o desacuerdo frente a diversas afirmaciones. Las opciones de respuesta fueron: 1 (totalmente en desacuerdo), 2 (en desacuerdo), 3 (ni de acuerdo ni en desacuerdo), 4 (de acuerdo) y 5 (totalmente de acuerdo) (Likert, 1932).

### **2.4.1 Encuesta Pre-Laboratorio**

Esta encuesta se llevó a cabo en la tercera semana del semestre académico, tuvo como finalidad recolectar información sociodemográfica de los estudiantes y valorar sus expectativas iniciales frente a la práctica. Entre los aspectos abordados se incluyeron su familiaridad con el entorno de laboratorio, el nivel de base teórica que percibían tener, su disposición para complementar el conocimiento teórico con actividades prácticas, así como su motivación por profundizar en los temas tratados en clase. Esta encuesta permitió establecer un punto de partida frente a la percepción general de los estudiantes sobre la actividad antes de su desarrollo. Las preguntas de esta encuesta son las que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Preguntas formuladas en la encuesta previa a la actividad.*

<b>Preguntas tipo Likert - Encuesta Previa</b>	
<b>1.</b>	Me gustaría reforzar los conceptos teóricos con actividades prácticas similares.
<b>2.</b>	Espero que esta práctica complemente de manera significativa los conocimientos teóricos adquiridos en clase.
<b>3.</b>	Anticipo que la práctica me motivará a profundizar en los temas vistos en la asignatura.
<b>4.</b>	Siento que tengo una base teórica suficiente para comprender los resultados que se obtendrán durante la práctica.
<b>5.</b>	Estoy familiarizado/a con el entorno de laboratorio en general.
<b>6.</b>	Confío en que podré aplicar lo aprendido en la práctica en futuros cursos o en mi vida profesional.

**2.4.2 Encuesta Post-Laboratorio**

Por su parte, la encuesta post-laboratorio estuvo orientada a conocer la percepción de los estudiantes sobre el impacto del laboratorio en su aprendizaje, formulándose con base en estudios previos que han documentado experiencias similares en cursos de diseño en concreto reforzado y mecánica de sólidos. Por ejemplo, Dymond en 2020 (Dymond, 2020) encontró que la implementación de actividades experimentales en cursos de Diseño de Hormigón Armado mejora significativamente la comprensión conceptual, especialmente al vincular la observación directa de modos de falla con los conceptos teóricos abordados en clase. De igual forma, Benjumea et al. en 2023 (Benjumea et al., 2023) reportaron que una experiencia de laboratorio con elementos

sometidos a torsión mejoró las habilidades experimentales y colaborativas de los estudiantes, fortaleciendo su capacidad de interpretar resultados y tomar decisiones fundamentadas. Estos hallazgos sustentan la formulación de la encuesta post-laboratorio en el presente trabajo, la cual se diseñó para evaluar aspectos asociados al desarrollo de habilidades prácticas, integración teoría-práctica y apreciación general de la actividad.

Las preguntas fueron organizadas en tres ejes principales: (i) trabajo en equipo, en línea con la competencia ABET SO-5, (ii) desarrollo, análisis e interpretación de datos durante la experimentación, conforme a la competencia ABET SO-6, y (iii) capacidad de aplicar diseño de ingeniería que satisfagan necesidades específicas con consideración de factores globales y ambientales, conforme a la competencia ABET SO-2 (ABET, 2021). Además, se incluyeron preguntas abiertas que permitieron explorar de forma cualitativa aspectos como las dificultades enfrentadas, la aplicabilidad de los conceptos teóricos y las sugerencias de mejora por parte de los participantes. Las preguntas de esta encuesta son las que se muestran en la Tabla 4, y Tabla 5.

**Tabla 4.**

*Preguntas formuladas en la encuesta post-laboratorio.*

Preguntas tipo Likert - Encuesta Post-Laboratorio	Objetivo ABET relacionado		
	SO2	SO5	SO6
1 Durante la práctica de laboratorio, mi grupo estableció metas claras para el desarrollo del experimento.		✓	

	<b>Preguntas tipo Likert - Encuesta Post-Laboratorio</b>	<b>Objetivo ABET</b>		
		<b>relacionado</b>		
		SO2	SO5	SO6
2	Todos los integrantes del equipo participaron de manera activa en las actividades asignadas.		✓	
3	La comunicación entre los miembros del equipo fue efectiva durante la planeación y ejecución del laboratorio.		✓	
4	Se promovió un ambiente de trabajo respetuoso y colaborativo en todas las fases de la práctica de laboratorio.		✓	
5	El trabajo en equipo contribuyó significativamente al cumplimiento exitoso de los objetivos del laboratorio.		✓	
6	Comprendí cada una de las etapas del procedimiento experimental realizado durante el ensayo de vigas.			✓
7	La guía y enunciados de laboratorio para la elaboración y ensayo de vigas proporcionados por el docente y el auxiliar de la asignatura fue suficiente para llevar a cabo la experiencia.			✓
8	La observación de la construcción y ensayo de las vigas me permitió relacionar la teoría con la práctica.			✓
9	Participé activamente en la toma de datos y su posterior análisis.			✓
10	El análisis de resultados me ayudó a identificar diferencias entre el comportamiento esperado y el observado.			✓
11	La experiencia experimental reforzó mi criterio técnico para comprender los modos de falla y desempeño del concreto reforzado.			✓

	<b>Preguntas tipo Likert - Encuesta Post-Laboratorio</b>	<b>Objetivo ABET</b>		
		<b>relacionado</b>		
		SO2	SO5	SO6
12	El trabajo me ayudó a entender el impacto del cemento tradicional sobre las emisiones de CO2	✓		
13	El trabajo me permitió ver alternativas sobre el uso de materiales para concreto tradicional	✓		
14	El trabajo me permitió ver el impacto del uso de cementantes alternativos en la resistencia del concreto.	✓		
15	Considero que el uso de cementantes alternativos podría integrarse en proyectos futuros como una opción viable y sostenible.	✓		
16	Me interesaría profundizar en como los cementantes alternativos impactan el comportamiento mecánico del concreto reforzado	✓		

**Tabla 5.**

*Preguntas abiertas de la encuesta post-laboratorio.*

<b>Preguntas abiertas</b>	
17	¿Cómo podría mejorarse el material de guía para la elaboración y ensayo de vigas proporcionado por el docente y el auxiliar de la asignatura?
18	¿Qué dificultades tuviste antes de la realización de la práctica de laboratorio?
19	¿Qué dificultades encontraste durante la práctica de laboratorio?
20	¿Tuviste dificultades al aplicar los conceptos teóricos durante la práctica de laboratorio?

---

**Preguntas abiertas**

---

- 
- 21** ¿Qué actividades específicas durante la construcción de la viga te ayudaron a reforzar tu comprensión del diseño en concreto reforzado?
- 
- 22** ¿Qué aspectos mejorarías en el desarrollo de la práctica?
- 

Esta encuesta se llevó a cabo en la semana 14 del semestre académico, una vez finalizadas las actividades del presente proyecto.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Ensayos de Laboratorio

##### 3.1.1 Ensayos de Compresión y Determinación de $f'_{cm}$

Los ensayos de compresión para determinar la resistencia a la compresión del concreto se realizaron a diferentes días (Figura 16), y se estimó su resistencia a los 28 días  $f'_{cm}$  con ayuda del modelo propuesto por el fib Model Code 2010 (Fédération Internationale du Béton, 2010), con la finalidad de brindar este dato experimental a los estudiantes de manera anticipada. En la

Figura 17 se muestra la predicción de resistencia del grupo C y en la Figura 18 se muestran las curvas de evolución de resistencia realizada para los estudiantes del grupo C y A, los cuales mostraron un porcentaje de error de 0.98% y 0.82%, respectivamente, evidenciando la precisión de este método para proyectar la resistencia de manera temprana. Este porcentaje de error se midió respecto al obtenido experimentalmente.

#### Figura 16.

*Primer ensayo de compresión realizado por el grupo C.*



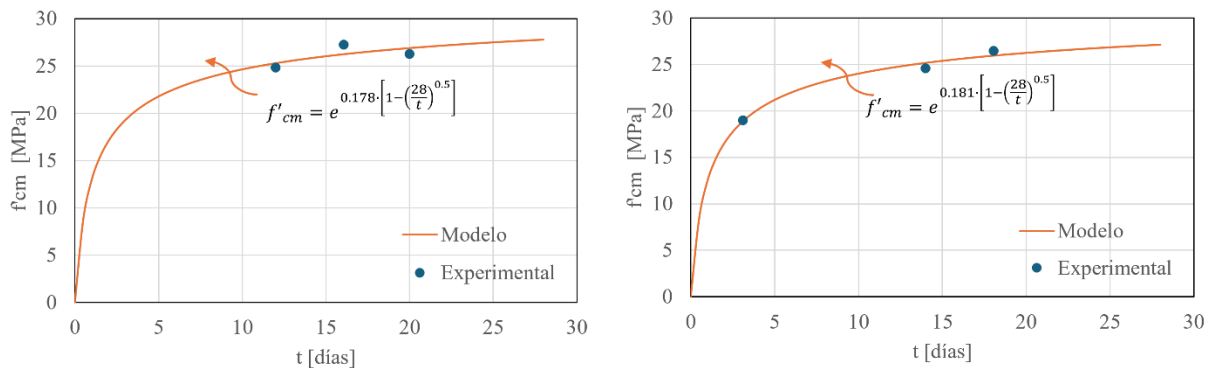
**Figura 17.**

*Predicción de resistencia de la mezcla del grupo C.*

Fecha de mezcla	Tipo de mezcla		% Error
9/04/2025 12:00	C-FA		0.98
Cilindro	Fecha de ensayo	Días de curado	Resistencia [MPa]
1	21/04/2025 11:44	11.99	24.840
2	25/04/2025 13:29	16.06	27.27
3	29/04/2025 11:59	20.00	26.26
4	7/05/2025 13:15	28.05	28.04
<b>f'c 28 teórico [MPa]</b>	27.77		

**Figura 18.**

*Curva de evolución resistencia grupo C (C-FA) y A (C-PC).*



Los estudiantes del grupo C elaboraron mezcla alternativa (C-FA), para contrastar su resistencia, en la Figura 18 se muestra la curva de resistencia obtenida por el grupo A, los cuales realizaron mezcla tradicional (C-PC) y obtuvieron una resistencia final de 26.93 [MPa], frente a una resistencia teórica de 27.15 [MPa].

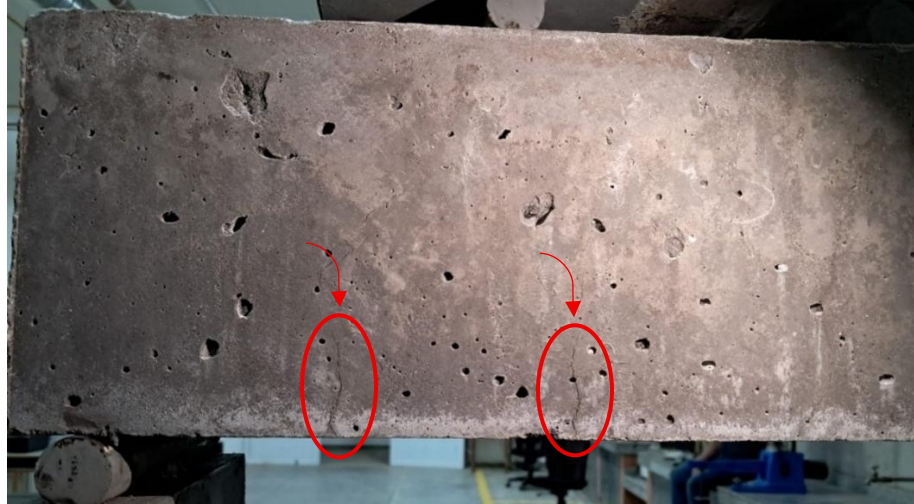
La similitud entre la resistencia obtenida por los dos grupos, a pesar de haber elaborado mezclas diferentes (una tradicional y otra con sustitución parcial de cemento por ceniza volante), constituye un hallazgo significativo dentro del proceso formativo. Este resultado no solo refuerza la validez técnica del uso de materiales cementantes alternativos, sino que también genera en los estudiantes una conciencia crítica sobre la posibilidad de adoptar soluciones sostenibles sin comprometer la resistencia. En este sentido, la experiencia permitió integrar de manera práctica los conceptos de sostenibilidad y eficiencia.

### **3.1.2 Ensayos de Flexión en Vigas**

Para todas las vigas se observó de manera inicial la aparición de pequeñas grietas por flexión en la zona inferior central de la viga, sin embargo, posteriormente la falla estuvo dominada por cortante. Posiblemente la prevalencia de este modo de falla se debió a que la separación entre estribos de los especímenes fue mayor a la mitad de la altura efectiva (50 [mm]) exigida por la NSR-10. La separación entre estribos construida fue de 100 [mm]. Este valor debió ser utilizado debido a la poca fluidez del concreto construido y la ausencia de equipos especiales para correcto vibrado y compactación de las vigas. Durante el ensayo, se identificaron aspectos cualitativos, como el tipo de falla inicialmente por flexión y posteriormente por cortante, los cuales se muestran en la Figura 19 y Figura 20, respectivamente, y se obtuvieron los datos de desplazamiento-carga, como se muestra en la Figura 21.

**Figura 19.**

*Inicio del agrietamiento por flexión.*

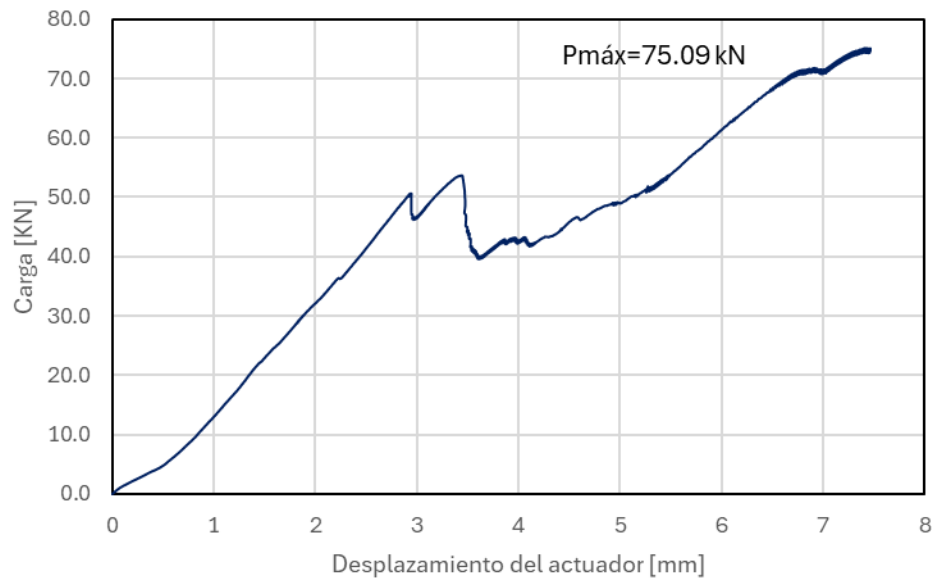
**Figura 20.**

*Viga del grupo A después del ensayo.*



**Figura 21.**

*Viga A gráfica desplazamiento-carga.*



Dado este tipo de falla, los estudiantes, quienes en esa semana del semestre académico se encontraban estudiando el tema de diseño a cortante y tensión diagonal en las clases impartidas por el docente, decidieron realizar la revisión por flexión y cortante e incluirlo en sus informes haciendo un análisis más detallado y completo del experimento. Adicionalmente, se socializó con ellos sobre este tipo de falla al finalizar cada jornada de ensayos (Figura 22), esto con el fin de complementar el tema para los que estuvieran interesados en agregar esta revisión.

**Figura 22.**

*Socialización sobre el tipo de falla por cortante y tensión diagonal para complementar la actividad.*



Los estudiantes concluyeron correctamente sobre el tipo de falla y las diferencias entre los datos experimentales y teóricos, mencionando los detalles constructivos anteriormente descritos como el refuerzo insuficiente en los apoyos y la separación de los estribos en los especímenes. La variabilidad entre los resultados manuales y computacionales tuvieron en general un porcentaje de error promedio de 0.5% en todos los grupos, y la variabilidad entre los resultados computacionales y experimentales tuvieron un porcentaje de error promedio de 33.54%. Esto se puede solucionar en futuras prácticas realizando un correcto distanciamiento entre los estribos (reduciendo su distancia a 50 [mm] en caso de realizar vigas con características similares) y escogiendo un

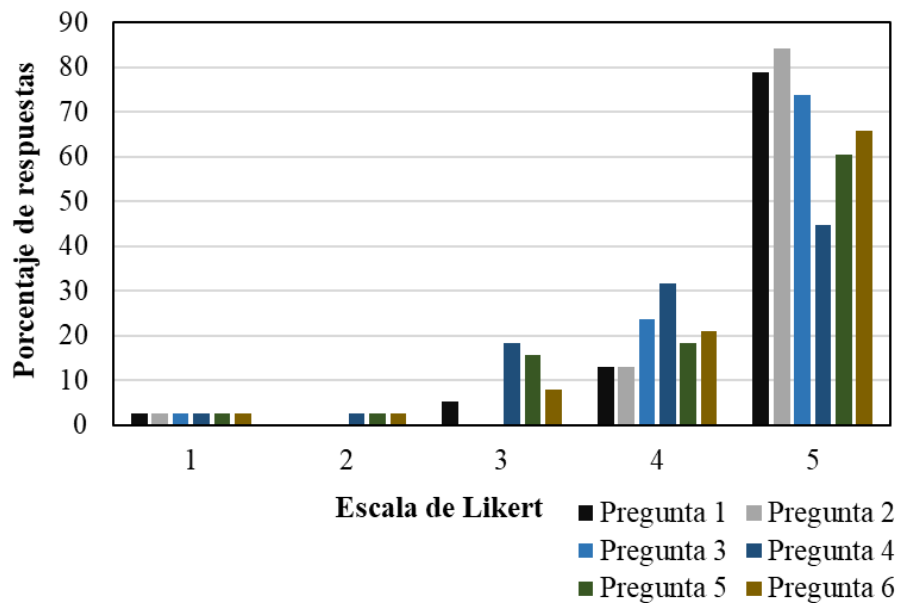
agregado con tamaño máximo nominal de 3/8” con el fin de mejorar la trabajabilidad del concreto y que no se presenten dificultades a la hora de compactar por la reducida separación de los estribos.

### 3.2 Encuesta Pre-Laboratorio

A continuación, se presentan los resultados de la encuesta aplicada semanas antes de implementar la práctica de laboratorio en la Figura 23, la cual buscó evaluar de manera inicial el interés de los estudiantes en participar en la actividad, familiaridad con el entorno de laboratorio y expectativas sobre la idea. Esta encuesta fue aplicada a 38 estudiantes del curso, el promedio y desviación de estas respuestas se pueden ver en la Tabla 6.

#### Figura 23.

*Resultados de la encuesta pre-laboratorio.*



**Tabla 6.**

*Promedio y desviación estándar de la encuesta pre-laboratorio.*

<b>Preguntas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Promedio</b>	4.66	4.76	4.66	4.13	4.32	4.45
<b>Desviación</b>	0.81	0.71	0.75	0.99	1.02	0.95

Las preguntas 1 a 3 (ver Tabla 3) estuvieron orientadas a medir el interés y las expectativas hacia las metodologías de la práctica como complemento a la teoría vista en clase. Los resultados reflejan una alta disposición de los estudiantes frente a este tipo de actividades: se observaron medias superiores a 4.66 y desviaciones estándar inferiores a 0.81. Este comportamiento revela una expectativa positiva sobre el valor formativo del laboratorio, así como una motivación para profundizar en las temáticas abordadas en el curso, lo cual sugiere que los estudiantes reconocen el potencial de la práctica para enriquecer su proceso de aprendizaje.

Sin embargo, al explorar la confianza en la base teórica para interpretar los resultados (pregunta 4), las respuestas presentaron mayor dispersión. Aunque un 44.74% se manifestó totalmente de acuerdo con sentirse preparado para interpretar los resultados experimentales, una porción significativa (18.42%) eligió una postura neutral y un pequeño porcentaje expresó desacuerdo. Este comportamiento puede estar relacionado con el momento de aplicación de la encuesta (tercera semana del semestre académico) cuando los temas aún se encontraban en desarrollo. Además, podría evidenciar vacíos en los conocimientos previos de asignaturas anteriores, lo cual marcó la necesidad de sugerir a los estudiantes el fortalecimiento individual de

ciertos conceptos y fue una de las razones para enfatizar en el análisis teórico-computacional durante la segunda fase del laboratorio.

En cuanto a la familiaridad con el entorno de laboratorio (pregunta 5), aunque la media alcanzó un valor aceptable de 4.32, la dispersión fue la más alta de toda la encuesta ( $\sigma = 1.02$ ). Esta variabilidad en las respuestas puede explicarse por la heterogeneidad de experiencias previas entre los estudiantes: algunos se encontraban cursando asignaturas prácticas por primera vez, como Caracterización de Materiales I (código 24096 – UIS), lo que implicaba un contacto casi nulo con espacios de laboratorio. Este hallazgo resalta la importancia de ofrecer una inducción básica a los procedimientos experimentales y protocolos de seguridad desde las primeras sesiones.

Por último, respecto a la aplicabilidad del aprendizaje en contextos académicos o profesionales, los resultados también fueron ampliamente positivos: el 65.79% de los estudiantes se mostró totalmente de acuerdo con la utilidad futura de lo aprendido en la práctica. No obstante, la desviación relativamente mayor sugiere que no todos los estudiantes lograban visualizar con claridad el impacto directo del laboratorio en su trayectoria profesional, lo cual podría ser debido a su nulo contacto con ambientes experimentales

Esta percepción refuerza la necesidad de que tanto el componente experimental como el computacional estén claramente vinculados a situaciones reales de diseño estructural, con el fin de fomentar una visión más clara de su aplicabilidad y pertinencia.

En conjunto, los resultados de esta encuesta muestran una actitud favorable hacia la práctica como recurso pedagógico, pero también identifican aspectos clave a fortalecer en la preparación y acompañamiento teórico previo, especialmente para asegurar que todos los estudiantes, independientemente de su nivel de experiencia, puedan aprovechar al máximo esta experiencia de aprendizaje.

### **3.3 Encuesta Post-Laboratorio**

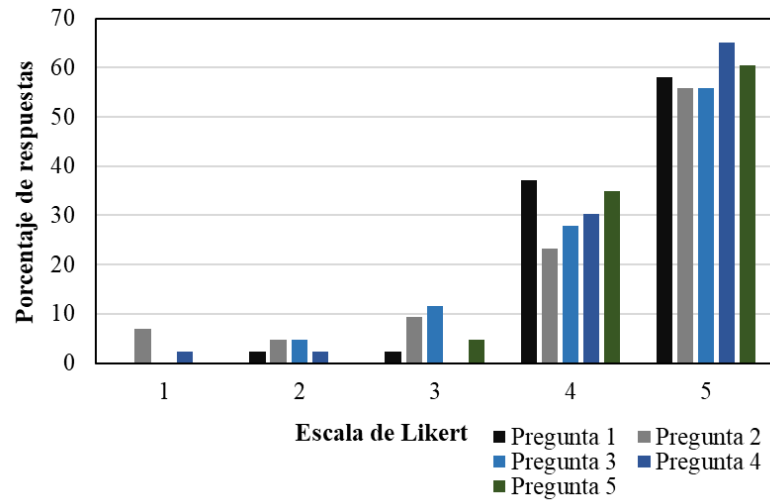
A continuación, se presentan los resultados de la encuesta aplicada en la semana 14 del semestre académico, cuando ya habían culminado las actividades de la práctica de laboratorio. Esta encuesta estuvo orientada a conocer el impacto de la práctica de laboratorio en el aprendizaje de la asignatura, dividiéndose en tres ejes principales de acuerdo con las competencias ABET SO-2, SO-5 y SO-6 (ABET, 2021).

#### **3.3.1 Componente Relacionado con ABET SO-5**

A continuación, se muestran los resultados de las preguntas relacionadas con ABET SO-5, (Figura 24), así como sus promedios y desviaciones estándar (Tabla 7). Estas preguntas buscan evaluar el trabajo en equipo durante la práctica de laboratorio.

**Figura 24.**

*Respuestas relacionadas con ABET SO-5 (preguntas 1-5 de la Tabla 4).*

**Tabla 7.**

*Promedio y desviación estándar para preguntas relacionadas con ABET SO-5.*

<b>Preguntas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Promedio</b>	4.51	4.16	4.35	4.53	4.56
<b>Desviación</b>	0.67	1.21	0.87	0.83	0.59

De manera general, los resultados reflejan que la práctica de laboratorio fue efectiva para fomentar competencias relacionadas con el trabajo en equipo, cumpliendo con lo establecido en el Student Outcome 5 (SO-5) del marco ABET (ABET, 2021). Los estudiantes no solo reconocieron la importancia de establecer metas claras (pregunta 1) y mantener una comunicación efectiva (pregunta 3), sino también valoraron positivamente el ambiente de colaboración y la contribución del equipo al éxito del proyecto (pregunta 4). Esto sugiere que la experiencia permitió aplicar

dinámicas colaborativas en un contexto de laboratorio, favoreciendo así el desarrollo de habilidades blandas cruciales para la práctica profesional de la ingeniería (Che et al., 2021).

Sin embargo, algunos aspectos revelan oportunidades de mejora. En particular, la participación de todos los miembros del equipo (pregunta 2) presentó la mayor dispersión de respuestas, con cerca del 21% ubicándose entre niveles 1 y 3. Esto podría indicar que en algunos grupos hubo distribución desigual de tareas. Este aspecto abre la necesidad de implementar mecanismos adicionales para promover una participación más equitativa, tales como la asignación explícita de tareas o autoevaluaciones grupales.

### **3.3.2 Componente Relacionado con ABET SO-6**

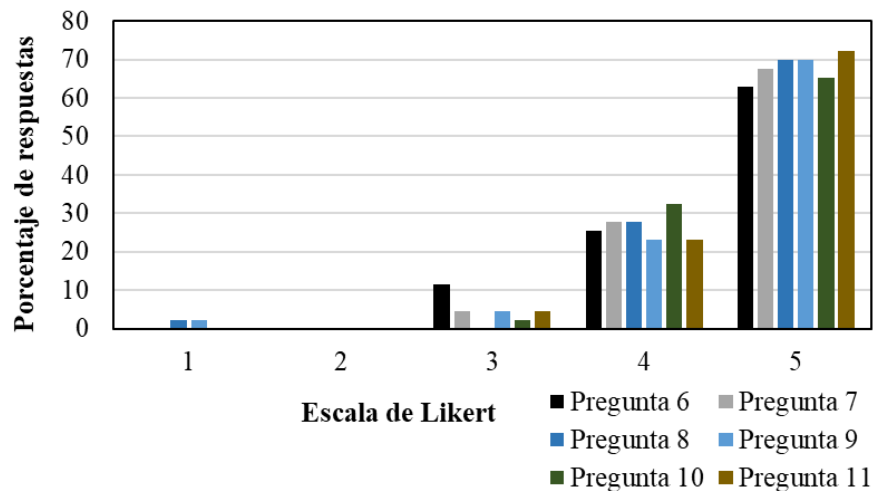
A continuación, se muestran los resultados de las preguntas relacionadas con ABET SO-6 (Figura 25), así como sus promedios y desviaciones estándar (Tabla 8).

Los resultados de esta sección reflejan una opinión satisfactoria por parte de los estudiantes de ambos cursos (F1 y G1) sobre la práctica de laboratorio en general, obteniendo una media por encima de 4.5 y una desviación no mayor a 0.8.

Uno de los aspectos más positivos fue la utilidad de las guías y el enunciado entregado a los estudiantes (pregunta 7), que fue evaluada con una de las medias más altas (4.63). Esto confirma que el acompañamiento docente, junto con un diseño didáctico claro, tuvo un impacto significativo en la experiencia.

**Figura 25.**

*Respuestas relacionadas con ABET SO-6 (respuestas 6 a 11 de la Tabla 4).*

**Tabla 8.**

*Promedio y desviación estándar para preguntas relacionadas con ABET SO-6.*

Preguntas	6	7	8	9	10	11
<b>Promedio</b>	4.51	4.63	4.63	4.58	4.63	4.67
<b>Desviación</b>	0.7	0.58	0.72	0.79	0.54	0.57

Otro punto destacable fue el reconocimiento de la experiencia práctica como un medio para relacionar la teoría con la práctica (pregunta 8), participar activamente en la toma de datos (pregunta 9), identificar diferencias entre teoría y observación real (pregunta 10) y reforzar el criterio técnico (pregunta 11). Estas competencias no solo son fundamentales para el perfil del ingeniero civil, sino que además responden directamente a las recomendaciones pedagógicas recientes que promueven el aprendizaje experiencial como eje del proceso formativo (Hadgraft & Kolmos, 2020).

No obstante, también se identificaron algunos aspectos que podrían ser objeto de mejora. Si bien la mayoría participó activamente en la toma de datos (pregunta 9), un pequeño grupo reportó niveles de participación más bajos, lo cual puede evidenciar una distribución desigual de responsabilidades o dificultades para asistir a las jornadas de laboratorio establecidas. Este aspecto fue ampliamente mencionado por los estudiantes que tuvieron dificultad para ajustarse a los horarios establecidos para las actividades de mezcla o ensayos. Para futuras implementaciones, se recomienda coordinar con mayor antelación las actividades experimentales, considerar franjas horarias alternativas (por ejemplo, sesiones cortas integradas al horario de clase) y utilizar metodologías para la conformación de grupos más balanceados. Estas sugerencias coinciden con las recomendaciones de Dymond (Dymond, 2020), quien al comparar distintas experiencias prácticas en cursos de diseño en concreto reforzado, encontraron que la participación desigual suele estar relacionada con restricciones logísticas y la autoselección de grupos, y proponen la formación estructurada de equipos, el fraccionamiento de actividades y una integración más formal del laboratorio al curso como estrategias efectivas para fomentar una participación más equitativa y significativa.

Adicionalmente, aunque la comprensión general del procedimiento experimental fue positiva (pregunta 6), la existencia de algunas respuestas neutras (opción 3) sugiere que ciertos estudiantes podrían beneficiarse de una instrucción más detallada o reforzada en aspectos puntuales del proceso experimental. Este hallazgo coincide con lo reportado por Cleary (Cleary, 2006), quien encontró que algunos conceptos no eran completamente comprendidos hasta que los

estudiantes observaron y analizaron los resultados de los ensayos físicos, lo que reforzó eficazmente el aprendizaje teórico.

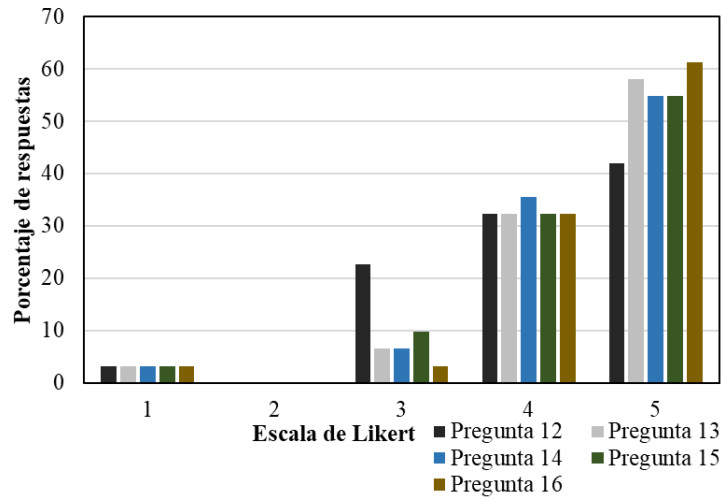
En conjunto, los datos reflejan que el componente práctico del curso logró trascender la ejecución del experimento, permitiendo a los estudiantes establecer conexiones entre la teoría, la experiencia directa y las implicaciones reales del comportamiento del concreto reforzado. Esto cumple de forma clara con las competencias establecidas por el resultado de aprendizaje ABET SO-6 y refuerza la pertinencia pedagógica de este tipo de actividades en la formación profesional. Esta observación coincide con lo señalado por autores como Hadgraft y Kolmos en 2020 (Hadgraft & Kolmos, 2020), quienes promueven el aprendizaje experiencial como eje central para el desarrollo de competencias cognitivas y prácticas en programas de ingeniería. De igual forma, estudios como los de Hale et al. (Hale et al., 2007) y Dymond (Dymond, 2020) han demostrado que la incorporación de actividades experimentales facilita la comprensión profunda de conceptos estructurales, el fortalecimiento del juicio técnico y la validación de modelos teóricos a través de la observación directa del comportamiento real de los materiales.

### **3.3.3 Componente Relacionado con ABET SO-2**

Finalizando la sección de preguntas tipo Likert de esta encuesta, se presentan los resultados del componente relacionado con ABET SO-2 en la Figura 26, así como sus promedios y desviaciones en la Tabla 9.

**Figura 26.**

*Respuestas relacionadas con ABET SO-2 (preguntas 12 a 16 de la Tabla 4).*

**Tabla 9.**

*Promedio y desviación estándar para preguntas relacionadas con ABET SO-2.*

Preguntas	12	13	14	15	16
<b>Promedio</b>	4.10	4.42	4.39	4.35	4.48
<b>Desviación</b>	0.98	0.89	0.88	0.91	0.85

Esta sección de la encuesta buscó explorar la percepción de los estudiantes frente al componente ambiental de la práctica. Los resultados obtenidos muestran un alto grado de acuerdo con las afirmaciones planteadas, con promedios que oscilan entre 4.10 y 4.48, y desviaciones estándar menores a 1, lo que indica consistencia en las respuestas.

En general, las respuestas reflejan que los estudiantes lograron comprender tanto el impacto ambiental del cemento tradicional como el potencial de los materiales alternativos. En la pregunta 12, el 41.94% respondió “totalmente de acuerdo” y el 32.26% “de acuerdo” con que la práctica los ayudó a entender las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso del cemento Portland. Aunque esta fue la afirmación con menor promedio (4.10), sigue reflejando una percepción positiva. Por otro lado, las preguntas 13 y 14, relacionadas con la identificación de alternativas al concreto tradicional y su influencia sobre la resistencia, obtuvieron promedios de 4.42 y 4.39 respectivamente. En ambas, más del 90% de los estudiantes seleccionó las opciones 4 o 5, lo cual indica que la mayoría reconoció tanto la existencia como el desempeño técnico de estos materiales. Esta percepción estudiantil es coherente con lo señalado por Pérez Jácome en 2021 (Pérez Jácome, 2021), quien evidencia el alto impacto ambiental derivado del uso del cemento Portland y destaca la urgencia de explorar alternativas tecnológicas más sostenibles, como el uso de materiales con menor huella de carbono y procesos de curado con CO<sub>2</sub>.

La comprensión técnica se refuerza aún más con los resultados de las preguntas 15 y 16, centradas en la aplicabilidad futura y el interés por profundizar en el tema. Un 54.84% estuvo “totalmente de acuerdo” en que los cementantes alternativos pueden integrarse en proyectos reales como opción sostenible, mientras que un 61.29% manifestó un fuerte interés por continuar aprendiendo sobre su efecto estructural. Estas respuestas, con promedios de 4.35 y 4.48 respectivamente, evidencian una apropiación más profunda del contenido ambiental y técnico abordado en la práctica.

En conjunto, los resultados muestran que la inclusión de una mezcla con reemplazo parcial de cemento no solo enriqueció el componente técnico del laboratorio, sino que también promovió una reflexión ambiental significativa. La similitud entre las resistencias alcanzadas por las mezclas tradicional y alternativa sirvió como evidencia concreta para los estudiantes, facilitando la comprensión del potencial de estos materiales en la construcción. Asimismo, la experiencia despertó motivación por profundizar en el análisis ambiental del concreto y su sostenibilidad, contribuyendo al fortalecimiento de competencias asociadas al resultado ABET SO-2 en un contexto pedagógico innovador. Este enfoque es coherente con lo reportado por Kudva P. et al en 2024 (Kudva P. et al., 2024), quienes demostraron que mezclas con altos porcentajes de reemplazo de cemento por ceniza volante pueden alcanzar niveles de resistencia estructural comparables al concreto convencional, al tiempo que reducen significativamente el impacto ambiental.

### 3.3.4 Respuestas Abiertas

A continuación, se presentan algunas respuestas representativas a las preguntas abiertas en la Tabla 10, las cuales buscan explorar de forma cualitativa aspectos como las dificultades, adaptabilidad y sugerencias de los estudiantes respecto a la práctica de laboratorio.

#### **Tabla 10.**

*Respuestas abiertas por parte de los estudiantes a la encuesta post-laboratorio.*

Pregunta	Respuestas de los estudiantes
17	"Me parece que como esta se entiende claramente los pasos y lo que toca hacer", "Que se grabe el proceso de realización de la viga".

Pregunta	Respuestas de los estudiantes
18	<p>"No presenté dificultades", "Antes no comprendía muy bien como era el procedimiento de fallo", "Cuadrar los horarios para poder asistir." "Encontrar un buen grupo".</p>
19	<p>"No encontré dificultades", "Problemas con la humedad de la arena, resolvimos esta dificultad con el auxiliar y el vídeo propuesto para el laboratorio", "La hora de realizar la práctica se me cruzó con hora de clase".</p>
20	<p>"Ninguna, Fue muy trabajable ya que comprendí bien los temas teóricos", "Sí, algunas, pero con el auxiliar fue posible resolverlas y también para el desarrollo de informe", "No, las dificultades estaban en materias antes de armado".</p>
21	<p>"Toda la actividad fue completamente nueva para mí, por lo tanto, todas las actividades me ayudaron a entender mejor el tema", "El fraguado, la construcción de la viga en sí", "Ver cómo fallaban los cilindros y ver cómo a la viga se le comportaban las líneas de falla y si fallaba a cortante o a flexión", "El modelo en SAP".</p>
22	<p>"Tanto la parte práctica como teórica estuvieron bien", "Ampliaría los tiempos de desarrollo, se entiende que por temas de calendario es difícil, pero el aumento de conocimiento desde la experiencia es significativo y vale la pena".</p>

Se observa que la práctica de laboratorio generó una experiencia significativa para la mayoría de los estudiantes, tanto en lo técnico como en lo pedagógico. En primer lugar, los comentarios permiten identificar que las dificultades previas a la práctica estuvieron más relacionadas con la comprensión inicial del proceso experimental, la coordinación de horarios y la conformación de los grupos de trabajo.

Durante la experiencia en laboratorio, algunas respuestas evidenciaron desafíos puntuales como el control de la humedad de la arena y cruces de horarios, aunque se resaltó positivamente el trabajo del autor y la utilidad del material de apoyo (videos y guías). En cuanto a la aplicación de conceptos teóricos, las dificultades fueron mínimas, lo que sugiere una buena articulación entre el componente práctico y los contenidos impartidos previamente en clase, aunque algunos estudiantes señalaron que la base conceptual previa de otras materias pudo haber afectado su desempeño.

Las respuestas a la pregunta 15 muestran que los estudiantes reconocen un impacto directo de la práctica sobre su comprensión del diseño en concreto reforzado. Actividades como el armado de la viga, el fraguado y la observación de los modos de falla durante el ensayo fueron percibidas como altamente valiosas para afianzar conceptos estructurales clave. También se destaca la utilidad del modelo en SAP2000 v.21.1.0 (Computers and Structures, 2024) para complementar la experiencia.

En cuanto a las sugerencias de mejora, los estudiantes recomendaron ampliar los tiempos asignados para el desarrollo de la actividad, facilitar material audiovisual complementario (como

grabaciones de la práctica) y fomentar una mayor participación equitativa dentro de los grupos, lo cual indica una disposición activa hacia la mejora continua de la experiencia pedagógica.

En síntesis, las respuestas abiertas evidencian un alto grado de satisfacción con la actividad, identifican áreas puntuales de mejora y reflejan cómo una estrategia de enseñanza experiencial bien diseñada puede contribuir de manera efectiva al fortalecimiento de competencias técnicas y al desarrollo del criterio profesional en estudiantes de ingeniería civil.

### **3.4 Calificaciones**

La Figura 27 muestra las calificaciones finales del componente de laboratorio, las cuales equivalen al 10% de la nota de la asignatura. En promedio, los estudiantes obtuvieron una calificación de 4.41 y una desviación estándar de 0.43 y un 100% de aprobación de la práctica de laboratorio. Este resultado sugiere que los estudiantes no solo comprendieron los conceptos impartidos durante las fases teórica y experimental del laboratorio, sino que además lograron articular adecuadamente ambos componentes en la elaboración del informe final.

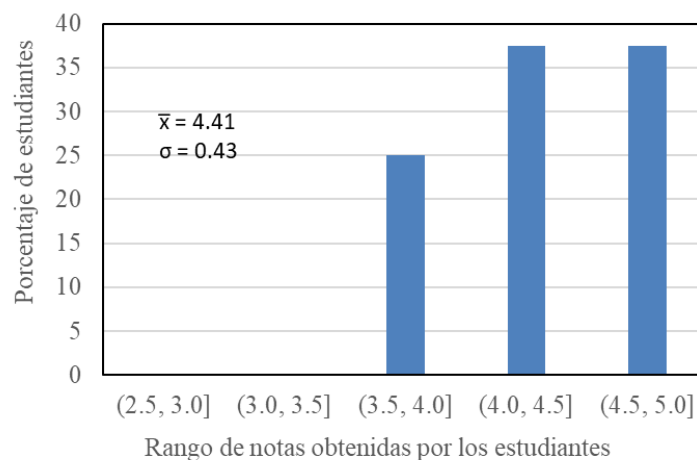
Aunque los resultados generales fueron positivos, se identificó un grupo de estudiantes con calificaciones en el rango de [3.5, 4.0], lo que sugiere oportunidades de mejora en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Este desempeño puede estar asociado a una participación limitada, dificultades en la comprensión de ciertos conceptos o diferencias en los estilos de aprendizaje. Para mejorar esta situación, se recomienda implementar estrategias de retroalimentación formativa individualizada, actividades de reflexión guiada y mayor diversificación en las formas de

participación. Según Nicol y MacFarlane-Dick (Nicol & MacFarlane-Dick, 2006), una retroalimentación efectiva debe ayudar a los estudiantes a identificar claramente la brecha entre su desempeño actual y el deseado, promoviendo la autorregulación. De igual forma, Prince (Prince, 2004) destaca que el aprendizaje activo y colaborativo mejora significativamente el rendimiento en cursos de ingeniería, particularmente al abordar dificultades de comprensión y motivación.

Estos datos, en conjunto con los resultados de percepción, permiten concluir que la experiencia de laboratorio no solo fue bien recibida, sino que también contribuyó de manera significativa al desarrollo de competencias técnicas, comunicativas y analíticas, fortaleciendo el proceso de aprendizaje dentro de la asignatura.

### Figura 27.

*Notas definitivas de la práctica de laboratorio.*



#### 4. Conclusiones

En este trabajo se implementó una práctica de laboratorio en la asignatura Diseño de Hormigón Armado I (código 24100 de la Universidad Industrial de Santander) integrando la experimentación de vigas de concreto reforzado y análisis computacional para la aplicación de los conceptos de los temas de flexión y cortante. A partir de los resultados se concluye que:

La experiencia práctica fortaleció significativamente la comprensión de los conceptos teóricos impartidos en clase. Los resultados de las encuestas y el desempeño general de los estudiantes muestran que la práctica de laboratorio favoreció la articulación entre los modelos analíticos abordados en clase y el comportamiento observado experimentalmente. La visualización del comportamiento de las vigas permitió a los estudiantes comprender de forma tangible los modos de falla, las trayectorias de grietas y el efecto del refuerzo de acero tanto transversal como longitudinal, aspectos que usualmente solo se abordan en el plano teórico.

Durante la actividad se evidenció el desarrollo de competencias clave como el trabajo en equipo y la capacidad de llevar a cabo procesos de experimentación. Los estudiantes participaron activamente en las fases de mezcla, vaciado, ensayo y análisis, fortaleciendo su habilidad para colaborar, comunicarse efectivamente y resolver problemas en conjunto. Asimismo, se promovió el desarrollo en su capacidad de recolección y análisis de datos experimentales y la comparación con modelos teóricos, cumpliendo con los objetivos formativos propios de la enseñanza.

La planeación cuidadosa de las actividades, la elaboración de guías y enunciados claros, así como el acompañamiento continuo, permitieron a los estudiantes vincular lo realizado en el laboratorio con el modelado numérico. Esto favoreció una mayor apropiación de las temáticas vistas en clase que buscó complementar esta práctica de laboratorio.

Esta experiencia práctica evidenció el valor de estrategias pedagógicas que integren experimentación, modelado computacional y conciencia ambiental como herramientas efectivas para la formación integral de futuros ingenieros. En particular, la incorporación de materiales con menor huella de carbono y el análisis comparativo de su desempeño frente a mezclas tradicionales permitieron a los estudiantes comprender de manera tangible las implicaciones ambientales del uso de estos materiales, así como identificar soluciones que reduzcan el impacto ambiental sin comprometer la resistencia del concreto. Este enfoque despertó una reflexión crítica sobre el rol de la ingeniería en la sostenibilidad, reforzando la necesidad de asumir criterios técnicos, económicos y ambientales de forma simultánea. Así, la práctica no solo fortaleció los conocimientos relacionados con la asignatura, sino que también impulsó una visión profesional más comprometida con el desarrollo responsable del entorno.

## **5. Recomendaciones**

Para futuros trabajos se sugiere considerar franjas horarias más amplias o alternativas en distintos días, con el fin de facilitar una mayor participación de los estudiantes en la jornada de mezcla. Durante esta experiencia, varios estudiantes manifestaron interés en asistir, pero no

pudieron hacerlo por restricciones de horario, lo cual limitó su involucramiento en las fases del proceso experimental.

En caso de realizar nuevas prácticas con vigas de dimensiones y resistencia similares ( $15 \times 15$  [cm],  $f'_c \approx 21\text{--}24$  MPa), se recomienda disminuir la separación entre los estribos a 50 [mm]. Durante los ensayos se presentaron fallas por corte, lo que sugiere que un mayor confinamiento por parte del refuerzo transversal podría permitir el desarrollo de mecanismos de falla controlados por flexión, en línea con los objetivos pedagógicos de la experiencia. También se recomienda disminuir el tamaño nominal del agregado grueso a  $3/8''$ , para mejorar la trabajabilidad del concreto y mejorar el proceso de compactación, el cual puede requerir más trabajo con una separación de 5 [cm] entre estribos.

Por último, para el componente computacional de análisis seccional se recomienda el uso de softwares de uso libre. Aunque para este proyecto se hizo uso del SAP2000 v24.1.0 (Computers and Structures, 2024) con la licencia proporcionada por la universidad, se recomienda para futuras implementaciones de la experiencia, considerar alternativas tales como Response2000 (Bentz, 2000), OpenSees (Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), 2006) y VecTor5 (University of Toronto, 2019).

### Referencias Bibliográficas

- ABET. (2021). *Accreditation Board for Engineering and Technology*. ABET Accreditation .  
<https://www.abet.org/accreditation/>
- American Concrete Institute. (2022). *ACI 211.1-22: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal-Density and Heavy-Density Concrete*.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*.
- ASTM International. (2019). *Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0566-19>
- ASTM International. (2020). *Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C0143\\_C0143M-20](https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20)
- ASTM International. (2022a). *Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C0078\\_C0078M-22](https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-22)
- ASTM International. (2022b). *Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0128-22>
- ASTM International. (2024a). *Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C0192\\_C0192M-24](https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-24)
- ASTM International. (2024b). *Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C0033\\_C0033M-24A](https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-24A)
- ASTM International. (2024c). *Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C0039\\_C0039M-24](https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-24)

- ASTM International. (2025). *Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. ASTM International. [https://doi.org/10.1520/C0031\\_C0031M-25A](https://doi.org/10.1520/C0031_C0031M-25A)
- Begliardo, H. F., Bonelli, M., Gudiño, S., & Fornari, J. F. (2008). *INTEGRACIÓN DE ASIGNATURAS EN INGENIERÍA CIVIL A PARTIR DEL DISEÑO PARAMÉTRICO DE ESTRUCTURAS Y SU RESOLUCIÓN POR ELEMENTOS FINITOS*. <http://www.frra.utn.edu.ar://www.amcaonline.org.ar>
- Benjumea, J. M., Cotes Prieto, D., Oyaga, L. C., Sepulveda, L. N. N., & Pulido, S. M. (2023). Development of Experimental and Collaborative Work Skills in the Students of Mechanics of Solids by Implementing a Low-Cost Torsiometer and Digital Image Correlation. *Revista Iberoamericana de Tecnologías Del Aprendizaje*, 18(1), 10–18. <https://doi.org/10.1109/RITA.2023.3249560>
- Bentz, E. C. (2000). *Response2000*. <https://www.hadrianworks.com/>
- Che, F. N., Vajjhala, N. R., & Strang, K. D. (2021, March 14). Perceived Student Learning, Attitudes and Experiential Learning in Software Engineering Education. *EDUNINE 2021 - 5th IEEE World Engineering Education Conference: The Future of Engineering Education: Current Challenges and Opportunities, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/EDUNINE51952.2021.9429095>
- Cleary, D. (2006). *2006-180: ENHANCING A REINFORCED CONCRETE DESIGN COURSE BY LINKING THEORY AND PHYSICAL TESTING Enhancing a Reinforced Concrete Design Course by Linking Theory and Physical Testing*.
- Computers and Structures, Inc. (2024). *SAP2000: Integrated Software for Structural Analysis and Design* (v24.1.0). <https://www.csiamerica.com/products/etabs>
- Dymond, B. Z. (2020). *Implementation of a laboratory experience in reinforced concrete courses*.

- Estes, A. C., & Klosky, J. L. (2002). *Designing Experiments in a Civil Engineering Curriculum*.
- Fédération Internationale du Béton. (2010). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*.
- Guerra-Macías, Y., & Tobón, S. (2025). Development of transversal skills in higher education programs in conjunction with online learning: relationship between learning strategies, project-based pedagogical practices, e-learning platforms, and academic performance. *Heliyon*, 11(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41099>
- Hadgraft, R. G., & Kolmos, A. (2020). Emerging learning environments in engineering education. *Australasian Journal of Engineering Education*, 25(1), 3–16. <https://doi.org/10.1080/22054952.2020.1713522>
- Hale, M., Freyne, S., College, M., & Durham, S. (2007). *AC 2007-2802: STUDENT FEEDBACK AND LESSONS LEARNED FROM ADDING LABORATORY EXPERIENCES TO THE REINFORCED CONCRETE DESIGN COURSE Student Feedback and Lessons Learned from Adding Laboratory Experiences to the Reinforced Concrete Design Course*.
- Kudva P., L., Nayak, G., Shetty, K. K., & H.K., S. (2024). Assessment of flexural response of RC beams and unrestrained shrinkage of fiber-reinforced high-volume fly ash-based no-aggregate concrete and self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136527>
- Likert, R. (1932). A Technique for the Measurement of Attitudes. *Archives of Psychology*, 22, 5–55.
- McCormac, J., & Brown, R. (2018). *Diseño de Concreto Reforzado*.
- Microsoft. (2025). *Microsoft Forms*. <https://forms.office.com/>



- Nicol, D., & MacFarlane-Dick, D. (2006). Formative assessment and selfregulated learning: A model and seven principles of good feedback practice. *Studies in Higher Education*, 31(2), 199–218. <https://doi.org/10.1080/03075070600572090>
- Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). (2006). *OpenSees: Open System for Earthquake Engineering Simulation*.
- Pérez Jácome. (2021). *SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA VERDE PARA EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA A PARTIR DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LA PRODUCCIÓN DEL CONCRETO PORTLAND, FOTOCATALÍTICO Y CAPTADOR DE CO2*.
- Prince, M. (2004). Does active learning work? A review of the research. In *Journal of Engineering Education* (Vol. 93, Issue 3, pp. 223–231). Wiley-Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x>
- Romero, M. L., & Museros, P. (2012). *Learning “Structural Analysis” with K ’ N E X and SAP2000: a practical experience in Spain*.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations General Assembly Resolution A/RES/70/1. <https://sdgs.un.org/goals>
- Universidad Industrial de Santander. (2024). *Sitio web oficial UIS*. <https://uis.edu.co/es/>
- Universidad Industrial de Santander. (2025). *Plataforma LMS - Moodle UIS*. <https://lms.uis.edu.co/>
- University of Toronto. (2019). *VecTor5*. <http://vectoranalysisgroup.com/vector5.html>
- Van den Beemt, A., MacLeod, M., Van der Veen, J., Van de Ven, A., van Baalen, S., Klaassen, R., & Boon, M. (2020). Interdisciplinary engineering education: A review of vision, teaching,

and support. In *Journal of Engineering Education* (Vol. 109, Issue 3, pp. 508–555). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/jee.20347>

Warren Plugge, P. (2023). *A Hands-On Concrete Laboratory Framework for Construction Management Education*. *A Hands-On Concrete Laboratory Framework for Construction Management Education*.

## Apéndices

### Apéndice A. Guía de laboratorio y video explicativo como material de apoyo

### DISEÑO DE HORMIGON ARMADO I

### PRÁCTICA DE LABORATORIO

Bucaramanga, 01 de Abril de 2025
Prof. LEZO, PhD

GUÍA DE LABORATORIO PARA LA ELABORACIÓN DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO

En este documento se encuentran las indicaciones e instrucciones iniciales para la elaboración de vigas de concreto reforzado y cilindros, así como las cantidades de material para la práctica de laboratorio.

1. **Preparación de la mezcla:** Dadas las cantidades mostradas en la tabla 1, las cuales vienen del diseño de mezcla y caracterización de materiales realizadas previo a esta actividad, se debe realizar el proceso de mezcla siguiendo las indicaciones e instrucciones dadas por el docente y el auxiliar de la asignatura.
  - 1.1. **Preparación de material y equipos**
    - Verificar que la mezcladora se encuentre limpia y en buen estado.
    - Secar la arena (aproximadamente 17 kg) al sol directo durante 40 minutos.
    - Pesar los materiales según las cantidades indicadas:

*Tabla 1. Cantidades*

Cantidades			
Mezcla tradicional		Mezcla alternativa	
<b>Cemento</b>	7.74 kg	<b>Cemento</b>	7.353 kg
<b>Agua</b>	4.27 litros	<b>Agua</b>	4.27 litros
<b>Agregado Fino</b>	16.14 kg	<b>Agregado Fino</b>	16.14 kg
<b>Agregado Grueso</b>	18.72 kg	<b>Agregado Grueso</b>	18.72 kg
		<b>Ceniza</b>	0.387 kg

- 1.2. **Carga de los materiales a la mezcladora**
  - Introducir el agregado grueso y el 50% del agua a la mezcladora sin estar en funcionamiento.
  - Encender y dejar mezclar por 10 segundos.
  - Añadir el agregado fino y el cemento con la mezcladora en funcionamiento.
  - Añadir el resto del agua de manera gradual y controlada.
  - Dejar mezclar durante 3 minutos para garantizar una distribución homogénea de los materiales.
- 1.3. **Descarga y transporte**
  - Descargar la mezcla en recipientes con superficie lisa no absorbente o carretillas, evitando segregación (separación de sus componentes, como los agregados y el cemento, de manera no uniforme).
  - Evaluar la consistencia del concreto realizando el ensayo de asentamiento de acuerdo con la norma ASTM C143/C143M.

#### 1.4. Limpieza de la mezcladora

- Inmediatamente después de usar la mezcladora, enjuagar con agua para evitar la adherencia de residuos de concreto.
- Hacer girar la mezcladora con agua limpia durante unos minutos y vaciar completamente.

2. **Corte y colocación del refuerzo:** Con ayuda del maestro de construcción y del auxiliar de la asignatura, se realizará la colocación del refuerzo asignado, la cual se muestra en la figura 1.

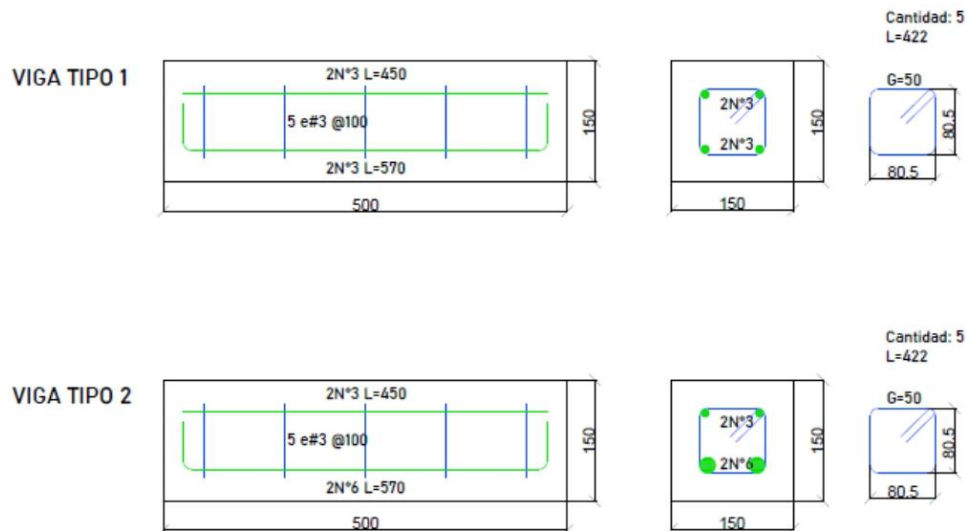


Ilustración 1. Despiece de las vigas a elaborar

3. **Vaciado de concreto en los moldes:** Una vez colocado el refuerzo, se debe realizar el vaciado del concreto siguiendo las indicaciones del docente, el auxiliar de la asignatura y la norma ASTM C31/C31M.

#### 3.1. Elaboración de vigas

- Para este proceso se solicita verter el concreto en tres capas de igual volumen.
- Realizar inmersiones entre capa y capa con la varilla apisonadora cada 14 cm<sup>2</sup>.
- Dar 15 golpes igualmente distribuidos entre capa y capa con el martillo de goma.
- Posterior a la consolidación del concreto, se debe aplanar la superficie con ayuda de un palustre o espátula hasta lograr una superficie plana.

#### 3.2. Elaboración de cilindros

Se deben elaborar, además, 4 cilindros de 10x20 cm con el fin de determinar la resistencia a compresión del concreto  $f'_c$ , para esto:

- Preparar el molde, sellando el agujero de su base con plastilina por el lado externo y recubriendo su interior con grasa.

- Verter el concreto en tres capas de igual volumen.
- Realizar 25 inmersiones entre capa y capa con ayuda de la varilla apisonadora, con una profundidad tal que la varilla penetre aproximadamente 12mm de la capa inferior.
- Dar de 10 a 15 golpes igualmente distribuidos con el martillo de goma.
- Posterior a la consolidación del concreto, se debe aplanar la superficie con ayuda de un palustre o espátula hasta lograr una superficie plana.

#### 4. Desencofrado

- Pasadas  $24 \pm 6$  horas, se debe realizar el proceso de desencofrado en las vigas y cilindros.
- En vigas, retirar los pasadores de las formaletas y separar los laterales del elemento de manera cuidadosa, use un palustre y martillo de goma en caso de ser necesario.
- En cilindros, acomode el cilindro boca abajo y retire la plastilina del agujero en la base, posteriormente con ayuda de la pistola de aire a presión, inyectar el aire comprimido de manera gradual a través del agujero y deslizar el molde de manera cuidadosa.

5. **Curado:** Las vigas y cilindros deben permanecer sumergidos en la cámara húmeda del laboratorio hasta su determinada fecha de ensayo.

#### Videos de referencia

Norma ASTM C143/143M (slump test): <https://www.youtube.com/watch?v=175b9fICXgs>

Norma ASTM C31 (elaboración de especímenes de concreto):

- Especímenes cilíndricos: <https://www.youtube.com/watch?v=7TnrFqtrYmw>
- Vigas: <https://www.youtube.com/watch?v=HvJKuJOEKGs&t=2s>
- **Video del proceso de mezcla (IMPORTANTE):** <https://www.youtube.com/watch?v=AHuuUeqSb0I>




Enlace al video tutorial de proceso de mezcla:

<https://youtu.be/AHuuUeqSb0I?si=25gPoxLMbYUYoKta>


**Apéndice B.** Sesión de análisis numérico-computacional

<https://youtu.be/p9tlOzfD5xw?si=SAbS2zAjEc1GwqAF>

## Apéndice C. Enunciado de actividad computacional



Universidad  
Industrial de  
Santander



### DISEÑO DE HORMIGÓN ARMADO I

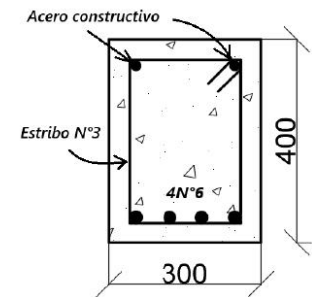
### PRÁCTICA DE LABORATORIO

Bucaramanga, 05 de Abril de 2025 Prof. LEZO, PhD

**FASE COMPUTACIONAL (3% DEL LABORATORIO)**

En este documento se encuentran los parámetros para realizar el análisis seccional de una viga de concreto reforzado, para lo cual, usted deberá realizar el diagrama de momento curvatura mediante su idealización trilineal de manera manual y posteriormente hacer uso del Section Designer del software SAP2000 para obtener el diagrama de momento-curvatura de manera computacional.

En la figura 1 se muestra la sección transversal de una viga de concreto reforzado, la cual está construida con concreto reforzado de  $f'_c = 21 \text{ MPa}$  y acero grado 420, estribos N°3, recubrimiento mínimo para vigas de concreto construido en sitio según NSR-10. Asuma módulo de elasticidad según NSR-10 para agregado mixto y módulo para el acero de refuerzo  $E_s = 200 \text{ GPa}$ .



*Ilustración 1. Sección transversal bajo análisis M+ (unidades en mm)*

**PARTE I**

Con la teoría de estados elásticos del concreto, trace el diagrama de momento-curvatura de la sección dada. Para esto use por lo menos tres puntos característicos:

1. **Antes del agrietamiento:** para este caso puede asumir el método de sección transformada no agrietada para los cálculos, los cuales deben estar explícitamente evidenciados en su entrega y ejecutados paso-a-paso.

NOTA: Para este estado, asuma que el esfuerzo en la fibra más traccionada de concreto es igual al esfuerzo de rotura dada en la ecuación (C.9-10) de la NSR-10 y como límite de esfuerzo en compresión asuma:  $0.5 f'_c$ .

2. **Estado agrietado e inicio de fluencia en el acero:** para este caso puede asumir el método de sección transformada agrietada para los cálculos, los cuales deben estar explícitamente evidenciados en su entrega y ejecutados paso-a-paso.
3. **Estado último:** para este caso debe asumir la teoría del bloque equivalente de Whitney para los cálculos, los cuales deben estar explícitamente evidenciados en su entrega y ejecutados paso-a-paso.

Para los tres estados, usted debe calcular:

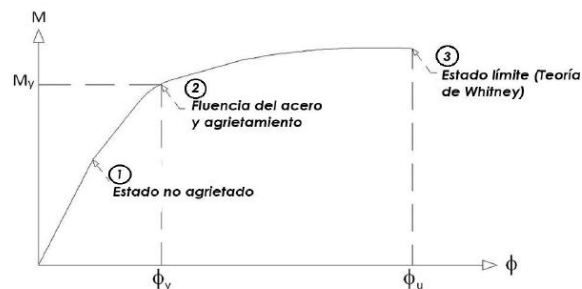
- Momento asociado a cada estado elástico ( $M_r, M_{cr}$  y  $M_n$  respectivamente) [ $kN - m$ ]

- Curvatura asociada a cada estado elástico ( $\phi_r$ ,  $\phi_{cr}$ , y  $\phi_n$  respectivamente) usando: (1) El concepto geométrico a partir del diagrama de deformación unitaria. (2) La definición del Título A de la NSR-10. Emplee 4 decimales y exprese la curvatura en formato: \_\_\_\_\_ x 10<sup>-3</sup> [1/m].

Con los tres puntos anteriormente mencionados, trace el diagrama de momento-curvatura de esta sección (ver ilustración 2) usando Excel para el gráfico de esta una vez calculados los datos de momento y curvatura correspondientes a cada estado elástico (pero recuerde que el procedimiento debe estar *paso-a-paso*).

**NOTA:** El desarrollo *paso-a-paso* de ambas partes de este taller debe presentarse con sus cálculos totalmente digitalizados en formato PDF, en caso de erróneamente presentarse procedimientos a mano escaneados esto se verá reflejado en la nota final.

*Ilustración 2. Trazado del diagrama momento-curvatura mediante los tres estados elásticos del concreto característicos.*



## PARTE II

Mediante la herramienta Section Designer del software SAP2000, haga el modelado de la sección transversal de la parte I y exporte el diagrama de interacción a Excel, sobreponiendo cada una con el diagrama obtenido manualmente correspondiente, posterior a esto, compare para el estado último:

- El momento nominal obtenido de manera manual con el computacional.
- La curvatura última obtenida de manera manual con la computacional.
- La deformación unitaria del acero en tensión obtenida de manera manual con la computacional.
- La deformación unitaria del acero en compresión obtenida de manera manual con la computacional.

Cada comparación se debe expresar en porcentaje de error, de manera que este no debe ser mayor al 3%.

### Entregables:

- Documento en formato PDF con el desarrollo de ambas partes de la actividad.
- Archivo de SAP2000 en formato SDB con el modelado de la selección propuesta.

### Fecha de entrega:



La presente actividad debe ser entregada vía Moodle con fecha límite: 21 de Abril de 2025 a las 23:30 h.

### Enlace clase de momento – curvatura (impartida el 04 de marzo):

- <https://www.youtube.com/watch?v=p9tlOzfd5xw>



**Apéndice D. Enunciado de actividad práctica**

		<b>DISEÑO DE HORMIGON ARMADO I</b> <b>PRÁCTICA DE LABORATORIO</b>
Bucaramanga, 05 de Abril de 2025		Prof. LEZO, PhD
<b>FASE PRÁCTICA (7% DEL LABORATORIO)</b>		
En este documento se encuentran los parámetros para la elaboración de vigas de concreto reforzado en el laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón para su posterior ensayo a flexión y análisis de resultados, para esta actividad se solicita unir dos grupos en uno solo y dejar registro de este nuevo grupo en Teams (deben escribir los números de ambos grupos y sus integrantes).		
Esta práctica de laboratorio se desarrollará en tres secciones, las cuales consisten en la elaboración de vigas, el ensayo a flexión para determinar su carga última y el análisis de resultados.		
<b>FASE I: ELABORACIÓN</b>		
Las instrucciones e indicaciones para la elaboración de las vigas y cilindros de concreto se encuentran de manera detallada en la guía de laboratorio, la cual se encuentra publicada junto a este documento.		
Para llevar a cabo esta fase, se establecerán dos jornadas mediante una encuesta para tener en cuenta la disponibilidad de los integrantes de cada grupo. Los asistentes a esta fase deben contar con póliza de accidentes o haber realizado el pago de derechos de salud este semestre (enviar evidencia al Moodle).		
Esta fase se conforma de las siguientes etapas:		
<ol style="list-style-type: none"><li data-bbox="326 1155 610 1180">1. <b>Preparación de la mezcla</b></li><li data-bbox="326 1211 594 1236">2. <b>Colocación del refuerzo</b></li><li data-bbox="326 1268 699 1293">3. <b>Vaciado de concreto en los moldes</b></li><li data-bbox="326 1325 565 1350">4. <b>Curado del concreto</b></li></ol>		
El plano que contiene el despiece de la viga a elaborar se encuentra junto a la guía de laboratorio.		
<b>FASE II: ENSAYO A FLEXIÓN DE TRES PUNTOS</b>		
Se realizará un ensayo de flexión en cuatro puntos siguiendo la norma ASTM C78/78M, con el fin de que cada grupo registre los datos obtenidos, tales como la carga última aplicada y el modo de falla observado.		
Se establecerán dos jornadas mediante una encuesta para llevar a cabo esta fase, con el fin de que la mayoría (ojalá todos) de los integrantes del curso puedan asistir.		
Con el fin de estimar la resistencia a compresión del concreto $f'_c$ , se realizarán ensayos de compresión siguiendo la norma ASTM C39/C39M (ver ilustración 2) sobre los cuatro cilindros elaborados a los 3, 7, 10 y 14 días de curado. Con estos datos se debe predecir el 100% de la resistencia a compresión haciendo uso del modelo de maduración del ACI 209, obtenido $f'_c$ , se puede iniciar a realizar los cálculos solicitados en el informe.		

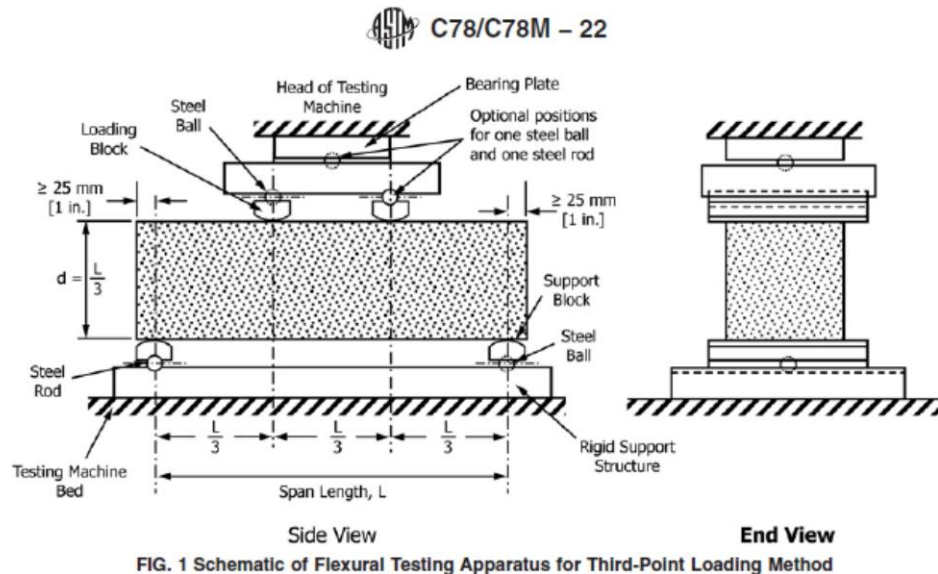


Ilustración 1. Ilustración del montaje del ensayo. Fuente: ASTM Internacional, 2023

### FASE III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta fase, se debe realizar la comparación entre los datos obtenidos en el ensayo de flexión, los valores teóricos y los obtenidos con la herramienta Section Designer del SAP2000.

Para lo cual, usted debe calcular los siguientes resultados:

1. **Resultados “a mano”:** Calcular el momento nominal, deformación unitaria del refuerzo en tracción y modo de falla de la viga sección transversal utilizando el modelo de Whitney. También calcule la carga externa que actúa sobre la viga, asociada al momento nominal, utilizando equilibrio estático.
2. **Resultados con SAP 2000:** Calcular el momento nominal, deformación unitaria del refuerzo en tracción y modo de falla de la viga sección transversal utilizando el Section Designer de SAP2000. También calcule la carga externa que actúa sobre la viga, asociada al momento nominal, utilizando equilibrio estático.
3. **Resultados experimentales:** Calcular el momento nominal obtenido del experimento utilizando equilibrio estático y la carga máxima registrada en el ensayo de laboratorio. También, describa el modo de falla con base en un análisis cualitativo de la fractura de la viga.

Con base en los resultados, realice las siguientes comparaciones. Para cada una cuantifique los porcentajes de diferencia y discuta sobre sus posibles causas.

- Comparación entre 1. Resultados “a mano” y 2. Resultados con SAP 2000.
- Comparación entre 2. Resultados con SAP 2000 y 3. Resultados experimentales.

### ENTREGABLES:

- Un informe en formato PDF que contenga:

- Descripción del problema (máximo 400 palabras).
- Metodología (máximo 1 página y media).
- Resultados y discusión (máximo 1 página).
- Conclusiones (mínimo 2 máximo 4).
- Un archivo en SAP2000 en formato .sdb que contenga el modelado en Section Designer de la sección propuesta, así como sus propiedades mecánicas (resistencia a compresión, módulo de elasticidad, etc).
  
- Memoria de cálculo en Excel con el procedimiento empleado en caso de utilizarse esta herramienta (opcional).

#### **FECHA LÍMITE DE ENTREGA**

- Los entregables deben enviarse vía Moodle el día 16 de mayo a las 23:30h.

**NOTA:** Este informe debe desarrollarse en los grupos unificados con los que realizaron la práctica de laboratorio.

