



Teoría de Estructuras en Ingeniería Mecánica o cómo acercar la industria al mundo académico

G. Vargas-Silva¹

¹ Departamento de Ingeniería, Universidad Pública de Navarra, gustavo.vargas@unavarra.es

Este trabajo presenta el desarrollo de un proyecto de fin de asignatura para estudiantes universitarios en entornos industriales reales, como método en el que las clases teóricas se complementan con experiencias prácticas de aprendizaje. A través de la realización de estos proyectos industriales, los estudiantes profundizan y comprenden la materia de la asignatura Teoría de Estructuras, relacionando los conceptos teóricos con situaciones técnicas reales. El vínculo que conecta a los estudiantes de último curso de Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad Pública de Navarra (en España) con las industrias locales, dentro del contexto de la asignatura, es el análisis estructural de un puente grúa real situado en una determinada instalación industrial (por ejemplo, taller, fábrica, laboratorio, almacén).

En el proyecto de diseño en el mundo industrial real participaron 14 industrias de Navarra y 42 estudiantes (de 66 matriculados), lo que representa cerca del 64 % del alumnado matriculado en la asignatura. La idea era animar a los estudiantes a trabajar con un enfoque diferente al de los cursos de ingeniería convencionales, en lugar de sus evaluaciones tradicionales en las que los estudiantes aprenden la materia solo para presentarse a los exámenes.

En este trabajo se dan más detalles sobre las razones de los estudiantes para elegir (o no) la vía de evaluación con proyectos en la industria, haciendo hincapié en que la opción que implica el proyecto es a la vez más exigente en cuanto a tiempo y más desafiante técnicamente. Este trabajo también quiere subrayar que los proyectos propuestos proporcionan a los estudiantes una exposición de primera mano a entornos industriales reales, prácticas, reglamentos, códigos y normativas, permitiendo visitar un emplazamiento real, y promoviendo posibles relaciones que podrían facilitar, entre otras cosas, la inserción laboral de los estudiantes participantes.

1. Introducción

La asignatura 242706 Teoría de Estructuras (también conocida como Análisis Estructural) es optativa en la carrera de Ingeniería en Tecnologías Industriales con especialización en Ingeniería Mecánica. Se trata de un curso de grado de 3 ETCS (Sistema Europeo de Transferencia de Créditos), con una dedicación horaria de 120 minutos a la semana. El curso introduce los métodos de diseño y cálculo de estructuras, y se centra en el análisis de estructuras estáticamente determinadas e indeterminadas. Asimismo, la asignatura desarrolla los conocimientos básicos de la asignatura de Elasticidad y Resistencia de Materiales, aplicándolos a sistemas estructurales, principalmente cerchas, vigas y pórticos.

Los temas correspondientes a la asignatura se imparten mediante clases teóricas seguidas de la resolución de ejercicios, es decir, una forma tradicional. Esta forma de enseñanza carece, entre otras cosas, de la posibilidad de proporcionar a los estudiantes experiencias prácticas de aprendizaje y la oportunidad de abordar entornos industriales reales [1, 2], sobre todo sabiendo que se trata de un curso de grado, en el que el final de la carrera académica está cerca, y que pronto tendrán que enfrentarse a la vida real de la ingeniería.

En esta línea, se le propuso al alumnado trabajar en proyectos orientados a la industria consistentes en analizar un puente grúa real situado en una instalación industrial determinada (es decir, un taller, una fábrica, un laboratorio, un almacén), con el fin de relacionar conceptos teóricos de Teoría de Estructuras con situaciones técnicas en el mundo real.

En este orden de ideas, el objetivo principal de la propuesta pedagógica de evaluación a la que atañe el presente trabajo es proporcionarles a los estudiantes una oportunidad para entrar en contacto con entornos industriales reales, y al conocimiento de prontuarios, reglamentos, códigos y normas, permitiendo visitas técnicas en instalaciones del entorno, y promoviendo posibles relaciones que podrían facilitar, entre otros aspectos, la inserción laboral de los estudiantes participantes.

2. Estructuras de puentes-grúa

La manipulación de materiales y productos es un componente esencial de los sistemas de producción, fabricación y distribución. Uno de los elementos estructurales más importantes de estos sistemas son las grúas, que participan en las operaciones cotidianas como una de las formas más eficientes para transportar las cargas de una posición a otra en una instalación industrial. Las grúas *in situ* se utilizan para elevar y bajar cargas pesadas y desplazarlas horizontalmente; por su parte, las grúas portátiles se emplean ampliamente para elevar y transportar elementos más pequeños alrededor de un área de trabajo en fábricas y talleres mecánicos. Sus características constructivas varían mucho en función de sus especificaciones operativas principales, como son: el tipo de movimiento, el carro de la grúa, el peso y el tipo de carga, la ubicación de la grúa y las características geométricas; éstas se denominan puentes grúa o grúas pórtico. La distinción habitual entre ellas es que, en los puentes grúa, toda la estructura suele ir sobre ruedas (a menudo sobre raíles). El componente principal de una grúa es la viga que transfiere la carga a los demás elementos estructurales. La gama de puentes grúa incluye grúas monorraíl, birraíl, de doble soporte y de un solo apoyo. Las grúas también pueden tener distinta capacidad de carga, envergadura y altura [3].

3. Propuesta de proyecto

El análisis de un sistema estructural para el soporte de cargas en movimiento (es decir, un puente grúa) brinda a los estudiantes la oportunidad de poner en práctica varios conceptos aprendidos en el aula. Este proyecto orientado a la industria es la piedra angular para vincular a los estudiantes de último curso con las industrias locales. El desarrollo del proyecto debe llevarse a cabo en grupos de tres alumnos. Es bien sabido que el aprendizaje en grupos pequeños es eficaz para promover tanto un mayor rendimiento académico como una actitud más favorable hacia el aprendizaje [4]. Cuando los estudiantes trabajan con compañeros, se sienten más cómodos y es más probable que se comprometan [5]. Además, el aprendizaje en grupos pequeños acompañado por compañeros es también un intento de preparar mejor a los estudiantes para su incorporación a un lugar de trabajo orientado al trabajo en equipo después de la universidad y con la idea de que el aprendizaje cooperativo en equipo podría mejorar la experiencia de aprendizaje [6].

Así, para llevar a cabo el proyecto en equipo, los estudiantes deben encontrar un puente grúa real en una instalación industrial concreta. Esta primera actividad obliga a los estudiantes a abrir su entorno académico y a entrar en contacto con personal en la industria. Después, el equipo debe visitar la instalación industrial (véase la Figura 1) y recopilar toda la información posible sobre su puente grúa. A continuación, se describen las principales características del sistema estructural que hay que analizar.

3.1. Contexto

Se deben presentar las consideraciones preliminares generales del sistema estructural, es decir, establecer un marco de referencia. Se requieren los siguientes contextos: geográfico (ubicación), industrial (empresa u organización

donde se ubica la estructura) y socioeconómico (situación de la zona donde se desarrolla la actividad de la industria).

3.2. Necesidades y requisitos

Es necesario describir las «entradas y salidas» del sistema, es decir, definir tanto las condiciones técnicas y estructurales como las características de uso: tipo de grúa, dimensiones principales, capacidad de carga (en toneladas) dimensiones principales, vida útil (en años), número de ciclos de maniobra, movimientos permitidos, entre otros. Se puede presentar un mapa conceptual, destacando dichas características.

3.3. Funciones técnicas

Hay que describir las principales funciones que debe desempeñar la estructura, indicando los componentes del sistema mecánico (estructurales, de fijación, de elevación, de movimiento, etc.) y establecer cómo interactúan entre sí.



Figura 1: Alumnos visitando las instalaciones industriales donde se encontraba su puente grúa.

Una vez que se ha definido cuál es el puente grúa a estudiar, comienza propiamente el proyecto de diseño / análisis, que consta de las cuatro fases siguientes con sus correspondientes informes (es decir, entregables evaluables):

- (1) Descripción del sistema móvil de soporte de cargas: idealización de una estructura tridimensional como una estructura bidimensional, considerando las reacciones del soporte y las correspondientes conexiones entre los miembros estructurales.
- (2) Acciones y combinaciones de carga: identificación de las principales cargas de servicio (cargas muertas, vivas, de impacto y ambientales), y diferentes combinaciones de carga según códigos y normativas.
- (3) Análisis estructural de vigas y pórticos: determinación de las reacciones en los apoyos (fuerzas y momentos), tensiones críticas y desplazamientos admisibles (pendientes y flechas), utilizando métodos teóricos de análisis estructural.
- (4) Modelización numérica del sistema estructural: uso de *software* comercial de análisis por el Método de los Elementos Finitos (MEF) para la verificación de los cálculos teóricos, y para proporcionar resultados más detallados.

Los principales temas tratados en el curso de Teoría de Estructuras que se deben considerar en el proyecto final incluyen: la determinación de cargas, los diagramas de cortante y momento y los métodos para analizar estructuras estáticamente determinadas e indeterminadas. Además, el proyecto final incluye una fase de introducción al uso

del *software* comercial de modelado RISA 2D [7], lo que le ofrece a los estudiantes habilidades técnicas reales que les servirán como complemento técnico para el desarrollo de asignaturas adicionales (tanto a nivel de grado como de máster o doctorado) y para el Proyecto de Fin de Grado (TFG); asimismo, el aprendizaje adquirido les podrá servir como herramienta técnica en la práctica profesional futura.

4. Evaluación

En esta asignatura 242706 Teoría de Estructuras, los alumnos podían elegir entre dos opciones de evaluación: una evaluación final o una evaluación continua. La primera se basaba en un único examen final tradicional escrito (tal y como se desarrollaba año a año antes de la actividad propuesta), y la segunda consistía en la combinación de tres actividades de evaluación: una actividad individual de aprendizaje semanal (x 10), un proyecto de trabajo en equipo cercano al mundo industrial (sobre el que versa este trabajo), y el mismo examen final mencionado.

En opinión del autor, la opción de evaluación continua, que incluye el proyecto en la industria real, requiere más tiempo y supone un mayor reto para los estudiantes, ya que también deben ocuparse de preparar el mismo examen final. Con respecto a la vía de evaluación única del examen final, podría animar a los estudiantes a procrastinar o a «dejarlo todo para el último momento», es decir, empezar a estudiar cuando terminan las clases, justo antes del examen final.

En cuanto a la opción que incluye el proyecto, por un lado, las actividades complementarias fomentan el estudio continuo durante el semestre, con una periodicidad semanal, y ofrecen a los estudiantes la oportunidad de recibir comentarios del profesor (retroalimentación) sobre las actividades de aprendizaje semanales y sobre los informes finales de los proyectos presentados. Este entorno de estudio continuo es beneficioso para los estudiantes, ya que afecta positivamente a su rendimiento académico. Por otra parte, el enfoque de los conceptos teóricos de análisis estructural con un proyecto práctico del mundo real fomenta el compromiso y motiva a los estudiantes hacia el autoaprendizaje y las habilidades técnicas industriales reales.

Conjuntamente, para los estudiantes participantes en el proyecto cabe destacar algunos beneficios que ofrecen las colaboraciones industriales: una exposición de primera mano a entornos industriales reales, un conocimiento de reglamentos, códigos y normativas técnicas, el conocimiento de un emplazamiento físico con infraestructuras reales, y la promoción de posibles relaciones que podrían facilitar prácticas académicas, futuras oportunidades de inserción laboral y una ventana a escenarios de ingeniería de la vida real.

5. Participación del alumnado

La vía de evaluación continua fue elegida por 42 estudiantes (de 66 matriculados), lo que representa el 63,6 % del total de matriculados en la asignatura. Esta alta participación habla en favor de las nuevas generaciones de ingenieros en cuanto a la motivación por el esfuerzo, el estudio y el aprendizaje. Esta propuesta metodológica y de evaluación ha animado a los estudiantes a trabajar con un enfoque diferente al de algunos cursos de ingeniería convencionales, en los que tienen evaluaciones tradicionales donde los estudiantes aprenden el material sólo para hacer los exámenes y aprobar la asignatura (o como algunos de ellos dicen: «quitarse la asignatura»).

Otro resultado interesante del proyecto de diseño del mundo real es que involucró a 14 organizaciones locales de Navarra, acercando el mundo académico a la industria y conectando a los estudiantes con diferentes personas del mundo de la ingeniería, como directores de operaciones, de proyectos y de producción, ingenieros, personal de administración y servicio y personal técnico.

Otra forma de abordar la cuestión de la participación en la opción de evaluación continua, incluido el proyecto industrial de trabajo en equipo, es preguntar a los estudiantes que no han participado en la actividad por qué no lo han hecho. A este respecto, se utilizó un instrumento de encuesta similar al SEEQ (*Student Evaluation of Educational Quality*) [8] o Evaluación de la calidad educativa por los estudiantes, para obtener la opinión de los alumnos no participantes. El cuestionario de la encuesta SEEQ constaba de once afirmaciones para evaluar las dimensiones correspondientes relacionadas con las decisiones de los estudiantes. Cada ítem tenía una respuesta en escala Likert de 5 puntos (1 = Totalmente en desacuerdo, 2 = En desacuerdo, 3 = Neutral, 4 = De acuerdo, 5 = Totalmente de acuerdo) para evaluar cuantitativamente las opiniones de los estudiantes. A continuación, se presenta el cuestionario de once dimensiones, similar al SEEQ, que se usó en este trabajo.

- (1) Aprendizaje: El proyecto final no me pareció intelectualmente estimulante ni interesante.
- (2) Entusiasmo: No me entusiasmó la elaboración del proyecto final de la asignatura.
- (3) Organización: Las instrucciones del proyecto final no estaban bien preparadas ni bien explicadas.
- (4) Interacción en grupo: No tuve un buen equipo de trabajo con el que desarrollar el proyecto final.
- (5) Relación individual: La orientación para el desarrollo del proyecto final por parte del profesor no fue la adecuada.

(6) Evaluación: La evaluación del proyecto final corresponde a un porcentaje muy bajo de la nota final de la asignatura.

(7) Dificultad: El tema para el desarrollo del proyecto final me pareció difícil y complicado.

(8) Carga de trabajo: Preveía que no iba a dedicar tiempo suficiente al proyecto final debido a otros compromisos académicos (tareas, trabajos, informes, exámenes).

(9) Examen final: Tener la opción de aprobar la asignatura sólo con el examen final me parecía más adecuado.

(10) Método de trabajo: El método de trabajo para el proyecto final, basado en entregas de informes, me pareció que implicaba un mayor esfuerzo que el método tradicional.

(11) Acercamiento a la industria: No me atraía la idea de desarrollar un proyecto final cercano al mundo laboral (industrial) real.

La encuesta SEEQ fue realizada por 19 de los 24 estudiantes no participantes, lo que representa una gran mayoría (79,1 %). Los resultados cuantitativos de la encuesta se presentan en la Figura 2. En opinión de la mayoría de los estudiantes encuestados, las dos razones principales para no participar en el proyecto final fueron la carga de trabajo (90 puntos) y el examen final (82 puntos). Estos resultados ponen en relieve el hecho de que la sobrecarga de trabajo y la pérdida de tiempo percibidas inicialmente en el reto del proyecto final fueron la principal motivación para no elegir la vía de evaluación continua. Asimismo, tener la opción de presentar sólo el examen final único fue un «atajo» que varios estudiantes consideraron.

Por el contrario, los dos motivos que menos los animaron a no optar por la vía continua fueron el acercamiento a la industria (31 puntos) y la organización (35 puntos). Desde esta perspectiva, los estudiantes señalaron que la relación con la industria local era un resultado positivo de la opción basada en proyectos, y que las instrucciones del proyecto final estaban bien preparadas/explicadas antes de su desarrollo, pero no fue suficiente para animarles a elegir la opción de evaluación continua.



Figura 2: Resultados cuantitativos de la encuesta SEEQ realizada por los alumnos que no participaron en la opción de evaluación continua que incluía el proyecto final.

6. Resultados del aprendizaje

6.1. Datos

Con el fin de comparar los resultados de aprendizaje del examen tradicional con la opción del proyecto del mundo real, se presenta la participación de todos los estudiantes matriculados en las actividades de aprendizaje semanales (x 10). Dicha participación fue alta al principio del semestre (alrededor del 75 %), pero disminuyó a medida que pasaban las semanas (hasta un 50 %), como se muestra en la Figura 3. Cabe mencionar que algunos estudiantes que decidieron seguir la vía tradicional del examen final presentaron algunas de las actividades de aprendizaje semanales (13/24 estudiantes), pero ninguno desarrolló los resultados del proyecto final. Una tendencia similar de disminución de la participación a lo largo del tiempo se observó en los estudiantes que tomaron parte en la opción de evaluación continua, en lo que respecta a la presentación de los cuatro informes del proyecto final (véase la Figura 4). La participación de los estudiantes en las actividades de aprendizaje continuado a lo largo del tiempo

fue siempre decreciente, lo que refuerza la idea de que hay, en efecto, una sobrecarga habitual a la que se enfrentan los estudiantes al final del semestre.

6.2. Discusión

Ahora bien, comparando los resultados de aprendizaje del examen final (en la convocatoria ordinaria) medidos para los estudiantes tanto en el itinerario basado en proyectos como en el tradicional, los resultados correspondientes se presentan en la Tabla 1. Considerando los alumnos con evaluación continuada, el 59,5 % de ellos aprobó el examen final, teniendo una nota igual o superior a 5,0; por el contrario, sólo el 25,0 % de los alumnos con evaluación tradicional lo aprobó. Otra forma de presentar este resultado es viendo que, del total de alumnos aprobados, el 80,6 % de ellos optó por la vía del proyecto, mientras que solo el 19,4 % realizó un único examen final para la evaluación de la asignatura. Además, sólo cuatro alumnos obtuvieron una calificación de 10,0 (Sobresaliente) en el examen final; todos ellos desarrollaron el proyecto de diseño del mundo industrial real.

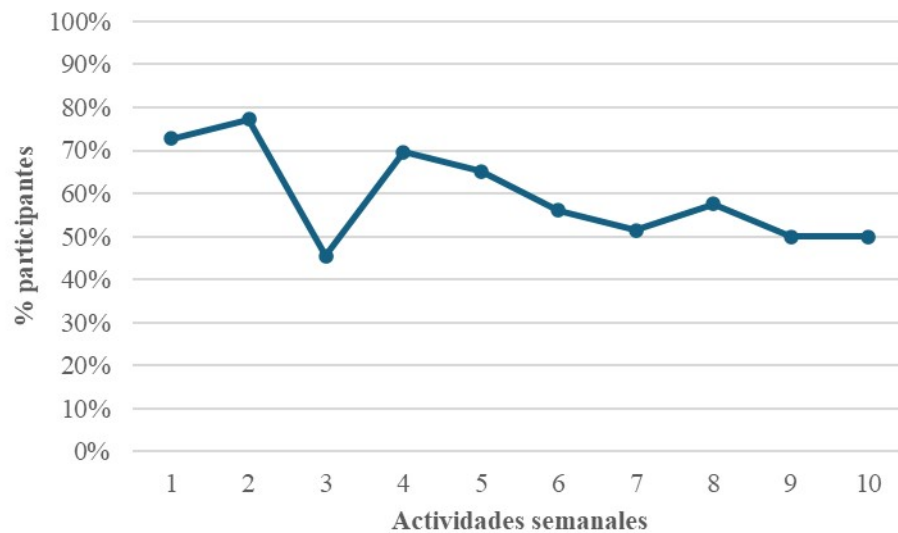


Figura 3: Porcentaje de participación en las actividades de aprendizaje semanales (x 10) de todos los alumnos matriculados a lo largo del tiempo (progreso de las actividades).

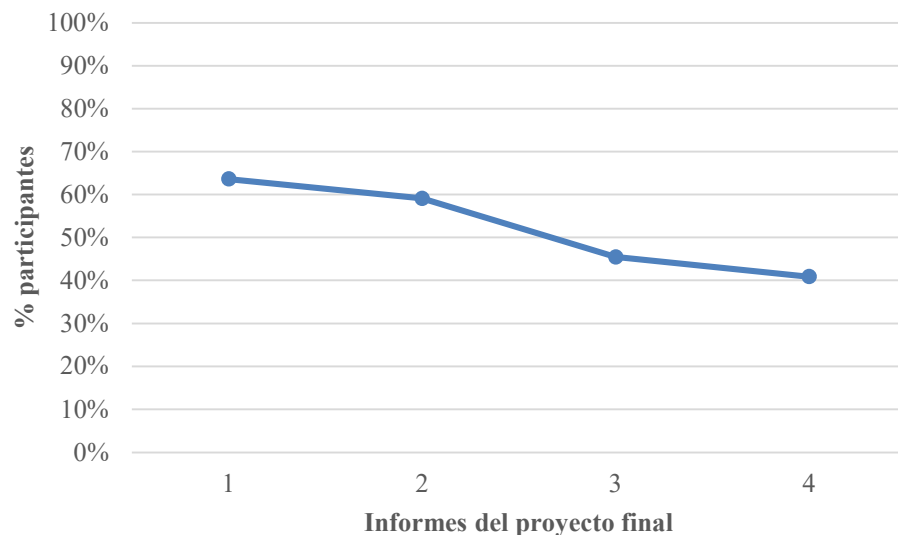


Figura 4: Porcentaje de participación en los informes finales del proyecto (x 4) de todos los alumnos matriculados a lo largo del tiempo (progreso de las actividades).

Por último, además de los resultados técnicos plasmados en los informes finales de los proyectos, como ya se ha indicado en la sección 3. Propuesta de proyecto, en dichos informes los estudiantes aportaron comentarios que vale la pena considerar. A continuación, se incluyen algunas ideas de comentarios específicos de los estudiantes, para expresar las mayores dificultades en la preparación de los informes correspondientes.

Tabla 1: Resultados del examen final de los alumnos con evaluación con proyecto y evaluación tradicional.

	Evaluación con proyecto	Evaluación tradicional	Total
Aprobados ($\geq 5,0$)	25	6	31
Suspendidos ($< 5,0$)	16	18	34
No presentados	1	0	1
Total	42	24	66

(Informe 1) Descripción del sistema móvil de soporte de carga:

«Ha sido complicado visitar en persona uno de estos sistemas de grúa y concertar una cita con la gente de la empresa».

«Ha sido la primera vez que hemos tenido que contactar con profesionales por nuestra cuenta y hablar con ellos para resolver nuestras dudas».

(Informe 2) Acciones y combinaciones de carga:

«Interpretar correctamente la normativa, adaptarla al caso práctico y definir unas combinaciones de carga realistas que contemplen todos los escenarios posibles.»

«Dar valores a determinadas variables. Por ejemplo, la velocidad a la que se desplaza el puente grúa y el carro, sus aceleraciones, la velocidad del viento y la carga de impacto.»

(Informe 3) Análisis estructural de vigas y pórticos:

«La parte del dimensionamiento de los elementos estructurales nos resultó difícil, pero al final lo hicimos lo mejor que pudimos».

«La mayor dificultad de esta entrega ha sido elegir qué perfil de doble T poner en el puente grúa».

(Informe 4) Modelización numérica del sistema estructural:

«La elaboración de este informe ha sido complicada, ya que la entrega estaba próxima a las fechas de exámenes, por lo que no hemos podido dedicarle mucho tiempo».

«La principal dificultad de este informe ha sido el uso del *software*. Aunque no ha sido una sorpresa ya que es una herramienta numérica totalmente nueva para nosotros.»

7. Conclusiones

En este trabajo se presenta un proyecto orientado a la industria como parte de una ruta de evaluación continua de un curso de Teoría de Estructuras, correspondiente a 3 créditos ETCS (*European Credit Transfer System*). El proyecto trata del análisis de un sistema estructural para el soporte de cargas en movimiento (es decir, un puente grúa) y consta de cuatro fases: (1) Descripción del sistema portante de cargas en movimiento, (2) Acciones y combinaciones de carga consideradas, (3) Análisis estructural de vigas y pórticos, y (4) Modelización numérica del sistema estructural. La evaluación basada en proyectos mencionados ofrece a los estudiantes de último curso la oportunidad de poner en práctica varios conceptos aprendidos en el aula y, sorprendentemente, representa su primera exposición a entornos industriales reales.

Cabe mencionar que los alumnos pueden elegir una de las dos opciones de evaluación: una vía tradicional basada en un único examen escrito tradicional (tal y como se desarrolla año tras año, previo a la actividad propuesta), o una vía de evaluación continuada que comprende tres actividades: una actividad individual de aprendizaje semanal, un proyecto de trabajo en equipo cercano al mundo industrial, y el mismo examen mencionado en la modalidad tradicional.

Alrededor del 64% del total de alumnos matriculados en el curso (42/66 estudiantes) eligieron la modalidad de proyecto final de diseño/análisis estructural, y participaron 14 industrias locales reales. El proyecto final animó a los estudiantes a trabajar con un enfoque diferente al de los cursos de ingeniería convencionales, a pesar de que su desarrollo exige más tiempo y supone un mayor reto técnico. Además, los estudiantes que optaron por el proyecto de diseño del mundo real obtuvieron mejores resultados académicos en el examen final común en comparación con los estudiantes que decidieron libremente no participar en la actividad propuesta.

En esta línea, el proyecto sugerido ofrecía a los estudiantes la oportunidad de visitar un emplazamiento industrial real y fomentar relaciones con el mundo real fuera del ámbito académico que pudieran promover experiencias de prácticas, futura inserción laboral y una ventana a entornos reales de ingeniería.

8. Referencias

- [1] R. M. Felder, and L.K. Silverman, "Learning and Teaching Styles in Engineering Education," *Eng. Educ.*, **78**, 7, 684-681 (1988)
- [2] R J. Kapadia, "Teaching and learning styles in engineering education," *38th Annual Frontiers in Education Conference*. IEEE (2008)
- [3] L. Sowa, and P. Kwiatón, "Numerical analysis of stress fields generated in the gantry crane beam," *Proc. Eng.*, **177**, 218-224 (2017)
- [4] L. Springer, M. E. Stanne, and S. S. Donovan, "Effects of Small-Group Learning on Undergraduates in Science, Mathematics, Engineering, and Technology: A Meta-Analysis," *Rev. Educ. Res.*, **69**, 1, 21-51 (1999)
- [5] J.E. Lewis, G. Willing, and T.D. Rockaway, "Peer-led Team Learning in Early General Engineering Curriculum," *ASEE Annual Conference & Exposition*, Seattle, Washington. ASEE Conferences (2015)
- [6] R.B. Hilborn, "Team learning for engineering students," *IEEE Trans. Educ.*, **37**, 2, 207-211 (1994)
- [7] RISA Tech Inc., "RISA-2D Rapid Interactive Structural Analysis," General Reference - Version **21**. Foothill Ranch, CA: RISA Tech (2024)
- [8] M. Coffey, and G. Gibbs, "The evaluation of the Student Evaluation of Educational Quality Questionnaire (SEEQ) in UK higher education," *Assess. Eval. High. Educ.*, **26**, 1, 89-93 (2001)