

FABRICACIÓN DIGITAL EN LA PEDAGOGÍA ARQUITECTÓNICA: UNA PERSPECTIVA PRÁCTICA PARA EL APRENDIZAJE

DIGITAL FABRICATION IN ARCHITECTURAL PEDAGOGY: A HANDS-ON APPROACH TO LEARNING

Caterina Morganti⁽¹⁾, Cristiana Bartolomei⁽²⁾

¹ Alma Mater Studiorum University of Bologna, Bologna, Italy, caterina.morganti4@unibo.it

² Alma Mater Studiorum University of Bologna, Bologna, Italy, cristiana.bartolomei@unibo.it

RESUMEN

En el contexto de la transformación digital de la educación y los procesos de virtualización, este estudio presenta una experiencia pedagógica innovadora llevada a cabo en el curso “Representación de Proyectos M”, parte del programa de grado de segundo ciclo (LM) en Ingeniería de la Edificación-Arquitectura de la Alma Mater Studiorum Universidad de Bologna en Italia. Durante los cursos académicos 2023/2024 y 2024/2025, los estudiantes trabajaron en la reproducción de edificios residenciales y en la réplica de las columnas diseñadas por Philippe Starck en el edificio Azkuna Zentroa de Bilbao. La experiencia se centró en el uso del modelado digital y el prototipado rápido, aprovechando las tecnologías disponibles en AlmaLabor, un makerspace universitario dedicado a la fabricación digital, el coworking y la colaboración interdisciplinaria.

El enfoque metodológico priorizó la retroalimentación iterativa, la adaptabilidad y el aprendizaje práctico mediante un flujo de trabajo estructurado que incluyó modelado 3D con Rhinoceros, impresión 3D FDM y corte láser. Este proceso permitió a los estudiantes desarrollar habilidades técnicas y fortalecer su comprensión de la representación arquitectónica desde una perspectiva digital y física. Los resultados evidenciaron mejoras en la visualización espacial, el dominio de herramientas de fabricación digital y la comprensión de la relación entre arquitectura histórica y tecnologías contemporáneas. La naturaleza iterativa del trabajo favoreció el refinamiento continuo y una mayor implicación en el proceso de diseño.

Además, la integración del prototipado digital y físico cerró la brecha entre teoría y práctica, generando un entorno de aprendizaje más inmersivo. La experiencia demuestra el valor pedagógico de la fabricación digital en la formación arquitectónica, no solo por el desarrollo de habilidades técnicas, sino también por la estimulación del pensamiento crítico y la resolución de problemas.

Este estudio destaca el papel clave de espacios como AlmaLabor en la evolución de la enseñanza arquitectónica contemporánea.

Palabras clave: fabricación digital, impresión 3D, aprender haciendo, aprendizaje experiencial

ABSTRACT

In the context of the digital transformation of education and virtualization processes, this study presents an innovative pedagogical experience conducted within the “Project Representation M” course, part of the second cycle degree programme (LM) in Building Engineering-Architecture at the Alma Mater Studiorum University of Bologna in Italy. The course's reference project for the 2023/2024 and 2024/2025 academic years focused on models related to architecture and architectural elements, specifically the reproduction of residential buildings and the replication of Philippe Starck's columns in the Azkuna Zentroa building in Bilbao. The experience focused on the use of digital modeling and rapid prototyping, leveraging the technologies available at AlmaLabor, a university makerspace dedicated to digital fabrication, coworking, and interdisciplinary collaboration.

The methodological approach prioritized iterative feedback, adaptability, and hands-on learning through a structured workflow that included 3D modeling with Rhinoceros, FDM 3D printing, and laser cutting. This process enabled students to develop technical skills and deepen their understanding of architectural representation from both digital and physical perspectives. The results showed improvements in spatial visualization, mastery of digital fabrication tools, and comprehension of the relationship between historical architecture and contemporary technologies. The iterative nature of the work encouraged continuous refinement and greater engagement in the design process.

Moreover, the integration of digital and physical prototyping bridged the gap between theory and practice, creating a more immersive learning environment. The experience demonstrates the pedagogical value of digital fabrication in architectural education, not only for the development of technical skills but also for fostering critical thinking and problem-solving.

This study highlights the key role of spaces like AlmaLabor in the evolution of contemporary architectural education.

Keywords: digital fabrication, 3D printing, learning by doing, experiential learning

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la educación superior ha experimentado una profunda transformación impulsada por la digitalización y la creciente disponibilidad de tecnologías de fabricación digital. En el ámbito de la arquitectura y la ingeniería, esta transformación ha permitido repensar los enfoques pedagógicos tradicionales, promoviendo entornos de aprendizaje que combinan el conocimiento teórico con la experimentación práctica. La integración de makerspaces y laboratorios de fabricación digital en los programas educativos representa un cambio paradigmático en la manera en que los estudiantes abordan el diseño, la representación y la materialización de proyectos arquitectónicos (Berman, 2012; Gershenfeld, 2005).

Este artículo presenta una experiencia pedagógica desarrollada en el curso “Representación de Proyectos M”, parte del programa de grado de segundo ciclo (LM) en Ingeniería de la Edificación-Arquitectura de la Alma Mater Studiorum Universidad de Bolonia en Italia (figura 1). El estudio se centra en el uso de herramientas digitales y procesos de fabricación para la representación de elementos arquitectónicos significativos, tomando como objeto de estudio la reproducción de edificios residenciales y las columnas de Philippe Starck en el edificio Azkuna Zentroa de Bilbao. Esta actividad se enmarca dentro de un enfoque de aprendizaje activo y experiencial, alineado con los principios del constructivismo educativo (Kolb, 1984).

The screenshot displays the website of the Alma Mater Studiorum University of Bologna. The header includes the university's logo and navigation links: HOME, UNIVERSITY, STUDY, RESEARCH, UNIVERSITY OUTREACH, and EVENTS AND NEWS. A search bar and links for Directories, Online services, Private area, and My e-mail are also present. The main content area shows the course title '93684 - Project Representation M' for the Academic Year 2023/2024. Below the title, a table lists the course details: Docente: Cristiana Bartolomei, Credits: 4, SSD: ICAR/17, and Language: Italian. Further down, the course modules and teaching mode are specified: Moduli: Cristiana Bartolomei (Modulo 1) and Caterina Morganti (Modulo 2); Teaching Mode: Traditional lectures (Modulo 1) and Traditional lectures (Modulo 2). The campus is listed as Bologna, and the course is part of the Second cycle degree programme (LM) in Building Engineering -Architecture (cod. 5697). At the bottom, two course timetables are shown, both for the period from Sep 20, 2023 to Dec 20, 2023.

Figura 1. Extracto de la página web del curso: “Representación de Proyectos M”, parte del programa de grado de segundo ciclo (LM) en Ingeniería de la Edificación-Arquitectura de la Alma Mater Studiorum Universidad de Bolonia en Italia.

2. OBJETIVOS

Esta experiencia educativa se enmarca en un enfoque innovador que busca integrar las herramientas de fabricación digital en la enseñanza de la representación arquitectónica. A través de una combinación de teoría, práctica y experimentación, se pretende proporcionar a los estudiantes un entorno de aprendizaje dinámico y colaborativo, donde puedan explorar activamente la relación entre el mundo digital y el físico. Al incorporar tecnologías como el modelado 3D, la impresión aditiva y el corte láser, se abre la posibilidad de repensar los métodos tradicionales de enseñanza, favoreciendo el desarrollo de competencias técnicas, creativas y críticas esenciales para la formación de futuros profesionales en el ámbito del diseño arquitectónico. En este contexto, se plantean los siguientes objetivos principales:

1. Explorar el potencial didáctico de la fabricación digital en el contexto de la enseñanza de la representación arquitectónica. Esta experiencia busca analizar cómo las herramientas de fabricación digital, como la impresión 3D, el corte láser y el fresado CNC, pueden enriquecer el proceso de enseñanza-aprendizaje en arquitectura (Savini & Savini, 2015). Se pretende que los estudiantes comprendan cómo estas tecnologías pueden utilizarse no solo para materializar ideas, sino también como instrumentos pedagógicos que favorecen la comprensión espacial, la precisión formal y la comunicación de conceptos arquitectónicos (Nelson et al., 2020).
2. Fomentar la comprensión de los estudiantes sobre la relación entre modelos digitales y objetos físicos. Se trata de ayudar a los estudiantes a establecer conexiones claras entre los modelos tridimensionales digitales que diseñan en software especializado y los objetos tangibles que se pueden fabricar a partir de ellos. Esta comprensión es clave para que puedan anticipar comportamientos físicos, tolerancias materiales y desafíos de ensamblaje, fundamentales en la práctica profesional de la arquitectura.
3. Desarrollar habilidades técnicas relacionadas con el modelado 3D, la impresión aditiva y el corte láser. Los estudiantes adquirirán competencias prácticas en el uso de software de modelado 3D, como Rhino, SketchUp o Fusion 360, así como en la preparación de archivos para la fabricación digital. Aprenderán a utilizar impresoras 3D y cortadoras láser de manera autónoma, desarrollando así una base sólida de conocimientos técnicos que podrán aplicar en múltiples áreas del diseño y la arquitectura (Seepersad, 2014).
4. Promover el pensamiento crítico y la resolución de problemas en contextos reales de diseño arquitectónico. A través del trabajo con prototipos y maquetas físicas, se busca estimular en los estudiantes una actitud crítica frente a las decisiones de diseño, obligándolos a evaluar sus propuestas no solo desde lo estético o funcional, sino también desde lo técnico y constructivo. Enfrentarse a problemas reales en la fabricación y el montaje fortalece su capacidad de análisis y mejora su toma de decisiones.
5. Integrar un enfoque iterativo y colaborativo en el proceso de enseñanza-aprendizaje. La experiencia promueve una metodología activa basada en la experimentación, la retroalimentación continua y el trabajo en equipo. Se alienta a los estudiantes a desarrollar sus proyectos en ciclos de prueba y mejora constante, compartiendo conocimientos, enfrentando desafíos comunes y aprendiendo de sus errores en un entorno de colaboración.
6. Evaluar el impacto del entorno de trabajo en makerspace sobre la motivación y el aprendizaje de los estudiantes. Finalmente, se pretende observar y analizar cómo el uso de un espacio de fabricación compartido, como un makerspace, influye en la actitud de los estudiantes hacia el aprendizaje. Se estudiará si este tipo de entorno favorece la creatividad, la motivación intrínseca, el aprendizaje autónomo y la apropiación del conocimiento a través de la experiencia práctica y tangible.

3. METODOLOGÍA

La metodología adoptada en este curso se fundamenta en principios de aprendizaje activo y colaborativo, con un fuerte componente práctico apoyado en el uso de tecnologías de fabricación digital. A lo largo del desarrollo del curso, los estudiantes participaron en un proyecto integral cuyo objetivo principal fue la reproducción, tanto digital como física, de elementos arquitectónicos seleccionados (Soomro et al., 2021). Esta experiencia permitió a los participantes enfrentarse directamente con los desafíos del diseño, la representación y la materialización de formas complejas, fomentando al mismo tiempo un aprendizaje significativo y contextualizado (figura 2).

El punto de partida consistió en la elección de los objetos de estudio, centrada en casos con valor arquitectónico relevante y morfología desafiante. Se seleccionaron, en particular, viviendas residenciales típicas (figura 3) y las columnas diseñadas por Philippe Starck en el edificio Azkuna Zentroa (figura 4), en Bilbao. Estos elementos fueron escogidos no solo por su riqueza formal, sino también por su potencial para ser analizados, modelados y reproducidos mediante técnicas digitales. Esta fase inicial implicó también una investigación detallada de carácter histórico y formal, en la que los estudiantes profundizaron en el contexto, la función y la estética de los objetos elegidos.

Una vez definidos los casos de estudio, los estudiantes procedieron a la fase de modelado digital utilizando el software Rhinoceros. Este proceso incluyó el análisis geométrico de las formas arquitectónicas, la construcción paramétrica de componentes y la preparación de archivos específicos para su posterior fabricación mediante impresión 3D o corte láser. Además, se introdujeron nociones fundamentales de interoperabilidad entre plataformas de diseño digital como Grasshopper y AutoCAD, subrayando la importancia de desarrollar competencias técnicas transversales que respondan a los nuevos escenarios de la práctica proyectual contemporánea (Oxman, 2008).



Figura 2. Colección de imágenes que capturan momentos del proceso de trabajo en la creación de modelos físicos realizados por los estudiantes del curso "Representación de Proyectos M".



Figura 3. Primer objeto de estudio - viviendas residenciales típicas. A la izquierda los planos/dibujos, a la derecha la maqueta física.



Figura 4. Primer objeto de estudio - columnas diseñadas por Philippe Starck en el edificio Azkuna Zentroa. A la izquierda los dibujos, a la derecha la maqueta física.

Posteriormente, se abordó la etapa de fabricación física. Los modelos previamente desarrollados fueron materializados en el laboratorio AlmaLabor, mediante el uso de tecnologías como la impresión 3D FDM (Fused Deposition Modeling) para las formas tridimensionales más complejas, y el corte láser para la elaboración de elementos planos estructurales y detalles complementarios. En esta fase, los estudiantes participaron activamente en todo el proceso técnico: configuración de parámetros, selección de materiales, gestión de los equipos y realización del postprocesado de las piezas producidas. Esta implicación directa les permitió no solo adquirir habilidades operativas, sino también reflexionar críticamente sobre las limitaciones y oportunidades que ofrece cada tecnología (Thompson et al., 2016).

Durante todas las fases del proyecto, se promovió una dinámica de retroalimentación constante y ajustes iterativos. Se organizaron sesiones de revisión crítica en las que los estudiantes recibieron comentarios por parte de sus compañeros y docentes, lo que les permitió refinar progresivamente sus modelos. Este enfoque iterativo fomentó una actitud abierta al aprendizaje a través del error, la experimentación y la mejora continua. Se implementaron rúbricas de evaluación formativa, así como mecanismos de autoevaluación periódica para consolidar el proceso reflexivo individual.

Finalmente, la evaluación del curso contempló múltiples dimensiones. Se valoró la calidad técnica y conceptual de los modelos físicos presentados, pero también la capacidad de los estudiantes para documentar y analizar su propio proceso de trabajo. Cada participante elaboró un informe reflexivo en el que sintetizó las principales decisiones tomadas, las dificultades encontradas y las competencias adquiridas. Además, se recogieron datos cualitativos y cuantitativos mediante encuestas de satisfacción, entrevistas y análisis de resultados de aprendizaje, con el objetivo de valorar el impacto global del enfoque metodológico y del entorno de trabajo en el desarrollo de la experiencia educativa.

4. RESULTADOS

Los resultados de esta experiencia pedagógica mostraron, en primer lugar, un avance significativo en las competencias técnicas de los estudiantes, quienes poco a poco fueron dominando con mayor soltura tanto el software de modelado 3D como las máquinas de fabricación digital.

A lo largo del proyecto se hizo evidente una mejora notable en la precisión geométrica y en el nivel de detalle de los modelos, así como una comprensión más profunda de las posibilidades y limitaciones de cada tecnología –desde las características del filamento en la impresión 3D hasta la calidad de corte del láser–, lo que les permitió convertir ideas abstractas en prototipos tangibles de forma cada vez más eficiente. Al mismo tiempo, surgió una mayor conciencia sobre los criterios de sostenibilidad en la selección de materiales y en la optimización de los procesos de fabricación, lo que refleja un enfoque responsable y proyectual.

En paralelo al desarrollo de habilidades técnicas, se observó un notable impulso en el ámbito cognitivo y metodológico: el carácter iterativo del curso fomentó el pensamiento crítico y la capacidad de autoevaluación continua, de modo que cada revisión de los modelos se convirtió en una oportunidad de aprendizaje y en un estímulo para analizar con rigor los aciertos y los errores. Esta apertura al ensayo y al fallo constructivo ayudó a consolidar una mentalidad resiliente y a valorar el aprendizaje basado en la experimentación, tan esencial para abordar los retos propios del diseño arquitectónico.

La implicación de los estudiantes fue extraordinaria, motivados por el entorno dinámico de AlmaLabor y el uso de tecnologías innovadoras que hicieron tangible el vínculo entre lo digital y lo físico. Trabajar en un espacio interdisciplinar facilitó la colaboración, el intercambio de conocimientos y el surgimiento de ideas inesperadas, mientras que el componente práctico y la autonomía en la gestión de los proyectos incrementaron el grado de satisfacción y compromiso con las actividades propuestas.

Por último, aunque los resultados fueron muy positivos, también se identificaron algunas limitaciones que abren nuevas líneas de mejora: al principio, muchos alumnos experimentaron dificultades para familiarizarse con las máquinas, lo que ralentizó las primeras iteraciones; además, la heterogeneidad en los niveles previos de conocimiento técnico generó cierta disparidad en la calidad de los productos finales. Estos hallazgos invitan a revisar la planificación temporal de las sesiones y a reforzar el acompañamiento inicial, de modo que todos los participantes puedan afrontar con mayor seguridad cada fase del proceso.

5. CONCLUSIONES

En el ámbito de la arquitectura y la ingeniería, los enfoques pedagógicos contemporáneos están evolucionando hacia metodologías activas y experienciales que promuevan un aprendizaje significativo y duradero. En este contexto, la integración del modelado digital y el prototipado físico en los procesos formativos se revela como una estrategia altamente efectiva. Esta combinación permite a los estudiantes no solo visualizar y comprender mejor las formas arquitectónicas complejas, sino también interactuar con ellas a través de la manipulación tangible y la experimentación directa. El modelado digital ofrece herramientas precisas para la representación tridimensional de ideas, mientras que el prototipado físico posibilita una comprensión material y estructural más profunda. Esta sinergia permite a los estudiantes experimentar con una variedad de materiales y técnicas constructivas, enfrentarse a desafíos reales del proceso constructivo y aplicar conocimientos teóricos en contextos concretos, desarrollando así una visión holística del proyecto arquitectónico o de ingeniería. Además, el uso de un enfoque iterativo basado en la prueba y el error fomenta competencias transversales esenciales en el entorno profesional actual. Entre ellas destacan el trabajo colaborativo, la comunicación efectiva, la resolución de problemas complejos y la gestión integral de proyectos. Estas habilidades, lejos de ser accesorias, son fundamentales en un mercado laboral cada vez más interconectado y multidisciplinario.

La colaboración interdisciplinaria —facilitada por la existencia de espacios creativos y colaborativos como Almalabor— enriquece aún más el proceso formativo. Estos entornos permiten a los estudiantes trabajar junto a profesionales y compañeros de otras disciplinas, lo que genera una dinámica de aprendizaje más rica, reflexiva y orientada a la innovación. Así, la formación no se limita a la adquisición de conocimientos técnicos, sino que se extiende al desarrollo de una mentalidad crítica y creativa, adaptable a los cambios y exigencias del entorno contemporáneo. En cuanto a las perspectivas futuras, el proyecto busca consolidarse mediante la ampliación de las redes de colaboración, incluyendo asociaciones con otras universidades, centros de investigación y disciplinas afines. Asimismo, se prevé la incorporación progresiva de tecnologías emergentes como la realidad aumentada (AR), la simulación digital avanzada y la inteligencia artificial, con el fin de potenciar las capacidades analíticas, proyectuales y comunicativas de los estudiantes. Estas líneas de desarrollo no solo posicionan a la arquitectura y la ingeniería como campos de conocimiento innovadores, sino también como plataformas educativas que promueven una formación integral, activa y orientada al futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berman, D. (2012). *Do good design: How designers can change the world*. New Riders. ISBN 978-0321573209. <https://davidberman.com/wp-content/uploads/Do-Good-Design-by-David-Berman-2018-editionaccessible-sample-pages.pdf>
- Gershenfeld, N. (2005). *Fab: The coming revolution on your desktop—From personal computers to personal fabrication*. Basic Books. ISBN 978-0465027453
- Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Prentice Hall. ISBN 978-0132952613
- Nelson, J., Berlin, A., Menold, J., & Parkinson, M. (2020). The role of digital prototyping tools in learning factories. *Procedia Manufacturing*, 45, 528–533. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.073>
- Oxman, R. (2008). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 29(2), 99–120. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- Savini, A., & Savini, G. G. (2015). A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference*, Tel-Aviv, Israel. <https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2015.7307314>
- Seepersad, C. C. (2014). Challenges and opportunities in design for additive manufacturing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 1(1), 10–13. <https://doi.org/10.1089/3dp.2013.0006>
- Soomro, S. A., Casakin, H., & Georgiev, G. V. (2021). Sustainable design and prototyping using digital fabrication tools for education. *Sustainability*, 13(3), 1196. <https://doi.org/10.3390/su13031196>
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65(2), 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>