

Geometría y Maquetas Móviles

Ana González Uriel; Manuel Ramos Martín; Licinia Aliberti; María Guillem González-Blanch

Departamento de Ideación Gráfica Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid

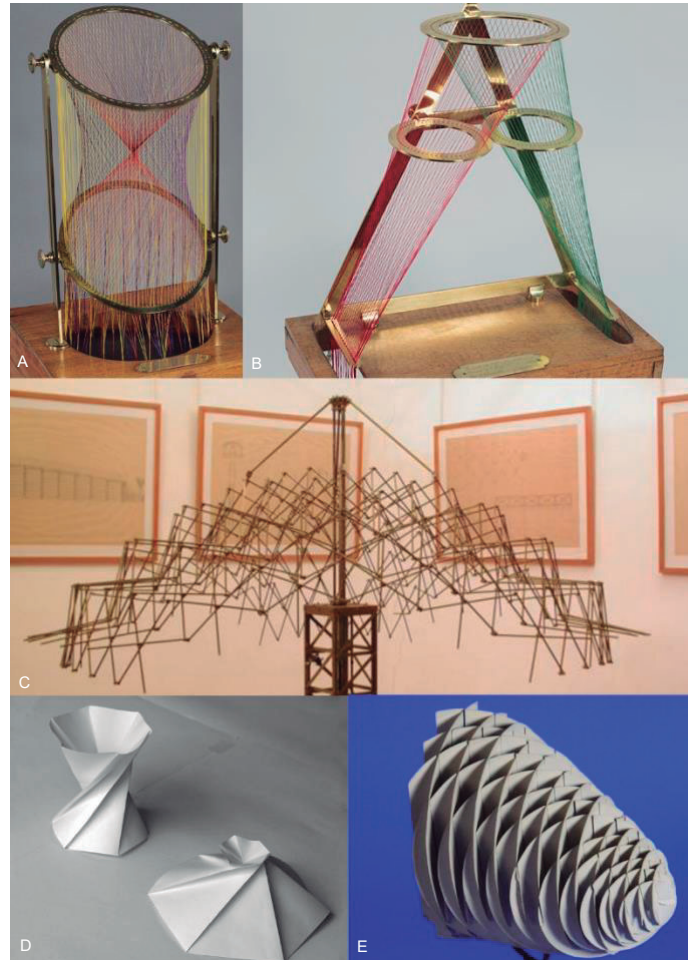


Figura 1. Maquetas móviles. A y B: Hiperboloide hiperbólico, cono y cilindro; intersección de conoides, por T. Olivier, 1830-1845. Union College Permanent Collection. C: Cubierta para teatro ambulante, por E. P. Piñero, 1961. Fundación Emilio Pérez Piñero. D: Hiperboloide hiperbólico, elaboración propia. E: Paraboloide elíptico, por A. Brill, 1892. Museo Nacional de Historia Americana.

Resumen / Abstract

Este trabajo analiza diferentes tipos de maquetas móviles para ser empleadas en el aprendizaje de Geometría en el área EGA. Se plantea su uso tanto como objetos elaborados, para ser mostrados y manipulados, cuanto como actividad para ser realizada por los estudiantes, con un enfoque pedagógico cercano al constructivismo. Los objetivos incluyen la recuperación o intensificación de aspectos materiales, hápticos y visuales, en apoyo de la comprensión y exploración de las propiedades y posibilidades de las formas geométricas. También se contempla como objetivo la promoción de razonamientos y deducciones sobre elementos fundamentales de estas formas y los vínculos entre ellos, a partir de su variabilidad, con la introducción de lenguajes de programación visual para la definición de maquetas móviles virtuales. La metodología conlleva el estudio de modelos históricos con diversas soluciones materiales y su posible aplicación en las condiciones actuales de docencia, así como la reflexión sobre configuraciones variables relacionadas, y su eventual presencia en ejemplos de arquitectura construida. Los resultados de la investigación apuntan a la existencia de un amplio conjunto de modelos viables, si bien con adaptaciones a los medios disponibles, y a una repercusión muy positiva de su realización.

Palabras clave / Key words

Geometría descriptiva; maquetas móviles; modelos articulados; geometría manipulativa; aprendizaje maker

1. Aprender viendo. Aprender haciendo. (Introducción)

El uso del dibujo como herramienta de pensamiento y resolución de problemas está en el origen de la disciplina “geometría descriptiva”, que mantiene actualmente su nombre en el área EGA de algunas escuelas, y en otras ha evolucionado a “geometría gráfica”, “geometría y representación”, “geometría y dibujo”, etc. Gaspard Monge codificó un sistema con recursos suficientes para operar gráficamente con el necesario rigor, que permitía *ver* lo que se estaba haciendo y tener una comprensión intuitiva además de racional de las formas proyectadas.

La geometría del arquitecto está inevitablemente vinculada al espacio sensible en que ha de actuar. Experimentar materialmente, con elementos físicos que tienen grosor y peso y se han de articular y sostener, añade una valiosa dimensión a la formación geométrica del estudiante.

La condición de movilidad conlleva una reflexión extra sobre la definición y propiedades de las superficies y curvas objeto de estudio y las relaciones entre los elementos geométricos que intervienen en cada caso. Además, las actuales aplicaciones de programación visual facilitan el manejo gráfico de condiciones y resultados variables, y favorecen el ensayo y reflexión sobre configuraciones móviles, a modo de maquetas virtuales sin presencia física pero sí visual e inmediata (Fig. 2).

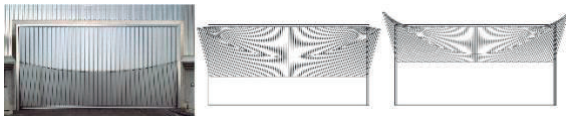


Figura 2. Izqda: Puerta de garaje, almacén Ernsting, por S. Calatrava; fuente: <https://calatrava.com/projects>. Dcha.: modelo paramétrico de conoides, elaboración propia.

2. Los modelos de Olivier. Maquetas con hilos.

Théodore Olivier (1793-1853), discípulo de Monge, ideó en la década de 1830 una serie de maquetas físicas para utilizar en su docencia de geometría descriptiva en la *École centrale des arts et manufactures de París*. Además de especialista en geometría descriptiva, lo era en mecánica -desarrolló importantes trabajos sobre engranajes (Hervé 2007)- y la singularidad de sus modelos radica en que pueden adoptar configuraciones variables. Se trata de unos 50 modelos hechos con hilos de seda que se mantienen tensos con peso en los extremos, o bien fijos a bastidores de latón, para representar superficies regladas. La mayoría muestran las condiciones de generación de una superficie o la intersección de dos de ellas. Una copia de la colección casi completa fue donada o vendida por el propio Oliver al *Conservatoire national des arts et métiers* entre 1849 y 1851. Numerosas maquetas originales se conservan en instituciones norteamericanas, adquiridas por profesores estadounidenses en la década de 1850 al autor o su viuda (Fig. 1A, 1B, 3).

Diversos talleres siguieron fabricando los modelos de Olivier, como los realizados por encargo del *South Kensington Museum* (Merrifield 1872), actualmente repartidos entre el *Science Museum* de Londres y el *Canada Science and Technology Museum* en Ottawa, los fabricados ca. 1870 para el *Instituto Industrial do Porto*, hoy en el *Museu do Instituto Superior de Engenharia* de esta ciudad, o los adquiridos en 1860 por la *Escola Politécnica de Lisboa*, parte de ellos actualmente en el *Museu Nacional de História Natural e da Ciência*. Modelos de superficies con hilos, similares a los de Olivier, continuaron siendo demandados por diferentes instituciones de educación superior y realizándose con profusión hasta bien entrado el s XX, como los elaborados en Alemania por Ludwig Brill y Martin Schilling (Fig. 4) (Polo 2007), cuyos catálogos incluían también modelos con barras articuladas y de cartón (Fig. 1 D, 1E)

En el marco de una propuesta para materializar móvilmente diversas superficies, hemos desarrollado un prototipo de hiperboloide hiperbólico con sedales de nylon de pesca. Basado en un modelo histórico, incorpora una serie de variaciones cuyo efecto se ha probado con la aplicación *Grasshopper*. Así, la directriz superior se desdobra en dos discos que giran en sentido opuesto gracias a un mecanismo de cuatro engranajes, vinculándose a cada disco una familia de rectas (Fig. 5).



Figura 3. Intersección de dos conos con dos planos tangentes comunes. T. Olivier, 1830-1845. Union College Permanent Collection.

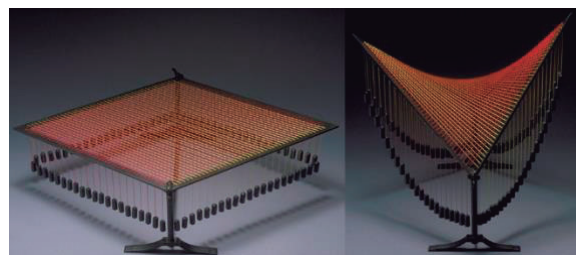


Figura 4. Paraboloides hiperbólico. Modelo realizado por L. Brill, 1892. Museo Nacional de Historia Americana.

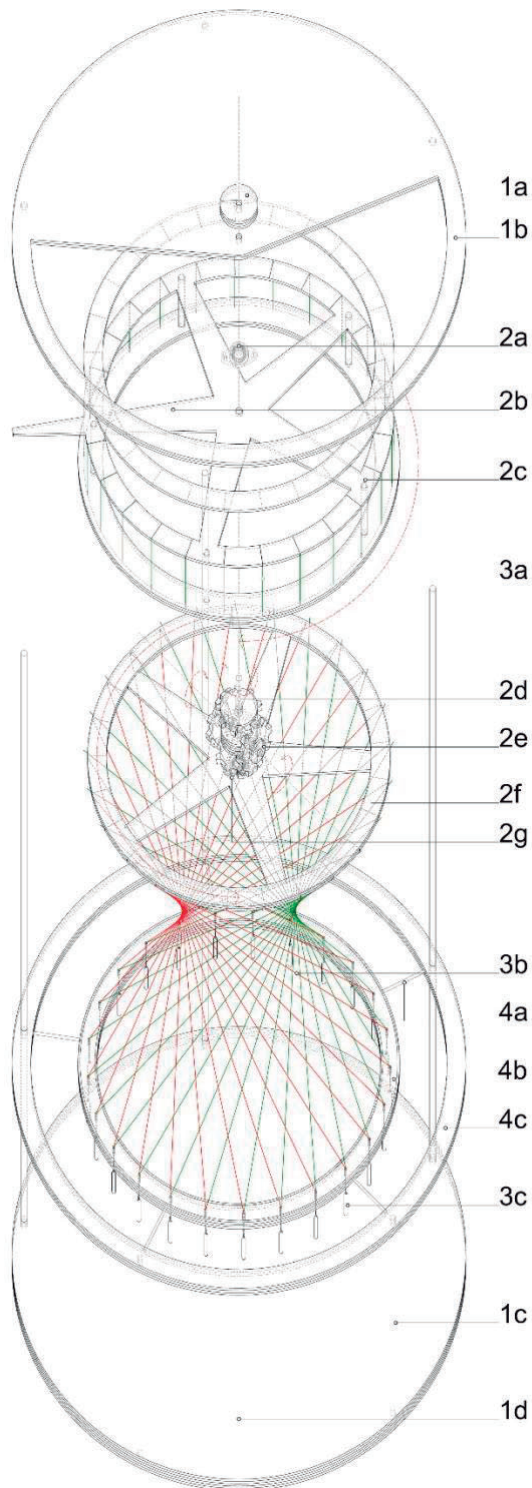


Figura 5. Diseño de maqueta móvil de hiperboloide hiperbólico. Elaboración propia. Descripción: 1. Estructura de soporte fija: (a) fijación superior, (b) estructura superior, (c) bastidores de sujeción, (d) base. 2. Directriz superior: (a) rodamiento de brida para giro de sección superior 2, (b) pieza para giro sección superior 2, (c) sección superior 2, (d) eje de rotación, (e) mecanismo para inversión de giro mediante cuatro engranajes, (f) sección superior 1, (g) rodamiento de brida para giro de sección superior 1. 3. Familias de rectas: (a) familia 2 nylon verde, (b) familia 1 nylon rojo, (c) pesas de plomo 3,5 g. 4. directriz inferior: (a) fijación de sección inferior mediante varillas, (b) sección inferior con perforaciones para paso de nylon, (c) disco de sujeción.

3. Modelos con barras y articulaciones

Emilio Pérez Piñero (1935-1972) desarrolló notables proyectos y estructuras construidas, para los que trabajó en minuciosos modelos a escala con que estudiar el movimiento real de sus propuestas, muchos de los cuales se conservan en la fundación que lleva su nombre en Calasparra, Murcia (Fig. 1C). En 1961 presentaba su premiada estructura para un teatro de 500 espectadores (Calvo y Sanz 2011) que podía “transportarse empaquetada entera y desplegarse desde el camión de traslado” (Puertas 1989, p.21). Entre los miembros del jurado se contaba R. Buckminster Fuller, autor en la década de 1950 de propuestas como la estructura geodésica desmontable *Necklace-Dome*, o la *Flying Seedpod*, que se desplegaba de forma mecánica con barras telescópicas radiales a modo de paraguas (Begiristain 2015, p. 79).

Piñero continuaría depurando y variando sus modelos. En 1964 CASA fabricó su Pabellón Transportable para la exposición *25 Años de Paz* (Fig. 6), montado primero en Madrid y luego en Barcelona y San Sebastián (Pérez Belda y Pérez Almagro 2016), que cubría cerca de 8000 m² a base de módulos de reducidas dimensiones (12 x 9 m, plegados 80 x 70 cm), con mallas planas de tijera que se montaban en el suelo e incorporaban barras de arriostramiento en la parte superior e inferior. En 1969 hizo un estudio de un módulo desplegable automático para unos Invernaderos en la luna por encargo de la NASA (Fig. 7).

Félix Escrig Pallarés (1950-2013), estudioso y continuador de la obra de Pérez Piñero, desarrolló a su vez distintas estructuras desplegables, especialmente las basadas en el mecanismo de tijera plana, siempre con el paso previo de la realización de modelos (Pérez Valcárcel 2014). Actualmente autores como Chuck Hoberman continúan experimentando con variantes de estos sistemas.

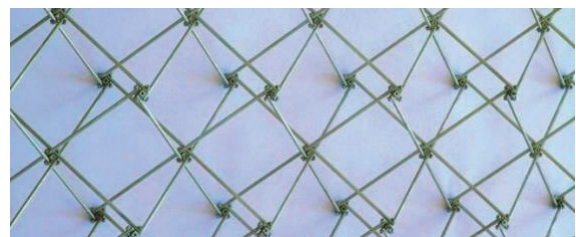


Figura 6. Detalle de maqueta de módulo de pabellón transportable, E. P. Piñero, 1964. Fundación Emilio Pérez Piñero. Fuente: <https://www.fsenece.es/secyt12/exposicion>

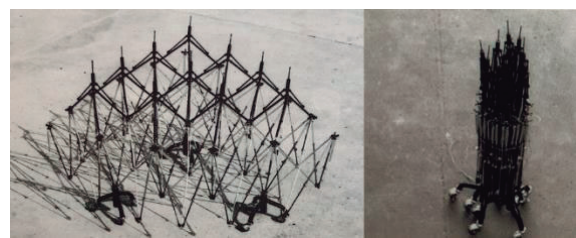


Figura 7. Propuesta para invernaderos en la luna, 1969. Fundación Emilio Pérez Piñero. Fuente: García y Lacalle, 2015, p.31.

4. Modelos de papel plegado

La tradición japonesa del origami se vincula a numerosas piezas móviles de arquitectura e ingeniería, de la estructura modular desplegable para la armada de EEUU, del propio Piñero junto a Candela en 1969-70 (Fig. 8A) a actuales sistemas de piezas planas para cubiertas retráctiles y protecciones solares variables (Fig. 8B).

Entre las primeras aportaciones científicas sobre el plegado de papel aplicado a problemas geométricos encontramos el trabajo del matemático indio Sundara Row “Geometric exercises in paper folding” (1893). Trata principalmente problemas de geometría plana y utiliza el plegado y desplegado del papel para trazar rectas y establecer relaciones entre elementos. Además de la solución de problemas relativos a ángulos y polígonos, el autor propone el trazado de curvas cónicas mediante el plegado de papel (Fig. 9). Durante el siglo XX y recientemente, esta técnica se ha investigado desde el punto de vista geométrico y se ha puesto en valor por su utilidad como práctica de razonamiento material que favorece el entendimiento de principios teóricos (Friedman y Rittberg 2021).

Esta técnica puede ser un recurso útil para el estudio geométrico de superficies tridimensionales. Los pliegues pueden tener direcciones opuestas y según su distribución se pueden definir lineales o rotatorios. Mediante su combinación y variando su dirección, proporción y relación recíproca, es posible generar estructuras plegables complejas a partir de una hoja plana (Jackson 2011).

Los pliegues permiten definir rectas rígidas, que podemos emplear como generatrices en el caso de las superficies regladas. Los helicoides, por ejemplo, se podrían estudiar aplicando pliegues lineales uniformes a una banda de papel alargada, añadiendo pliegues diagonales opuestos para generar la torsión de la figura. Resulta algo complicado controlar los ángulos de inclinación entre los planos generados por los pliegues, dificultando en cierta medida el desarrollo uniforme de la superficie. En el caso del paraboloides hiperbólico se puede conseguir una maqueta plegable a partir de un cuadrilátero aplicando pliegues en acordeón paralelos a los lados y pliegues en V en las diagonales. Esto conlleva que no podrán aparecer simultáneamente las dos familias de generatrices en la misma porción del cuadrilátero.

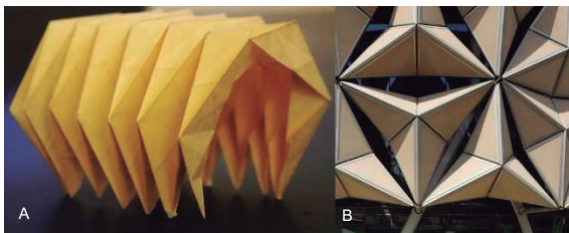


Figura 8. A: Propuesta para pabellón en la Antártida, 1969-70. Fundación Emilio Pérez Piñero. Fuente: García y Lacalle, 2015, p. 25. B: Detalle de fachada, Torres Al Bahar, Aedas Arquitectos, 1912. Fuente: <https://www.ahr.co.uk/projects>

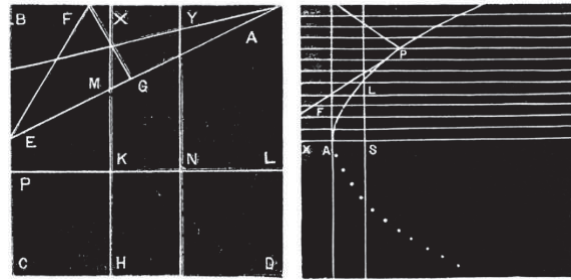


Figura 9. Construcción de un rectángulo equivalente a un cuadrado y trazado de una parábola mediante plegado y desplegado de papel.

Fuente: Sundara Row, 1893, p. 12 y 88.

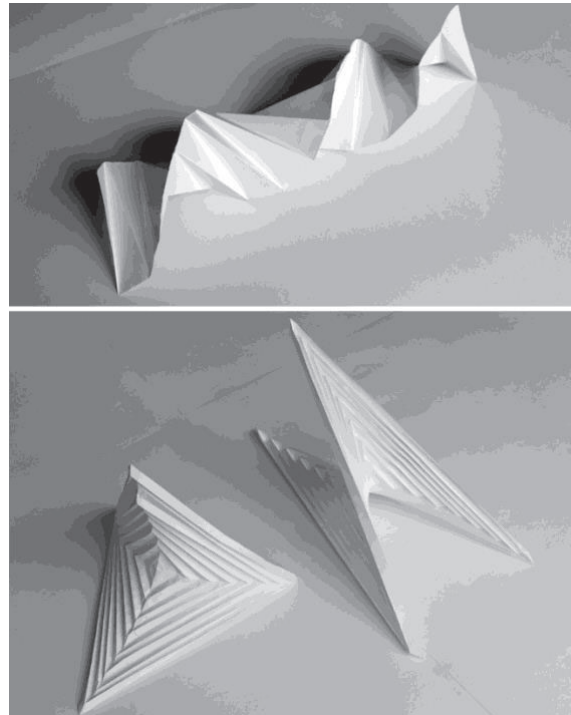


Figura 10. Aproximaciones mediante maquetas en papel plegado a un helicoides y un paraboloides hiperbólico. Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

La incorporación de maquetas, y especialmente de maquetas móviles, tanto como recurso de apoyo docente cuanto como actividad a desarrollar por el discente, puede favorecer un aprendizaje más significativo de las propiedades geométricas de curvas y superficies. Se ha comprobado que el manejo de elementos físicos y la necesidad de construir con dimensiones, volúmenes y gravedad hacen aflorar cuestiones fundamentales para un arquitecto también relacionadas con la forma. En paralelo, el empleo de herramientas de programación visual permite explorar alternativas y cambios de manera ágil y económica.

La posibilidad de que cada estudiante deduzca personalmente, a partir de la manipulación de elementos, todos los conceptos que nos gustaría que aprendiera pertenece quizá al mundo de las ideas – las de Emma Castelnuovo, Jean Piaget y tantos otros antes que ellos –, principalmente por limitaciones temporales. Pero sí es posible, y en nuestra experiencia muy positivo, introducir

esta opción. El estudio de precedentes, y la selección de propuestas a plantear en función de los contenidos a enfocar, puede ayudar a optimizar el tiempo empleado. Así mismo, la personalización de planteamientos en los casos a desarrollar por cada estudiante o grupo, y la posterior puesta en común de experiencias, contribuye a abarcar un mayor rango de temas.

Para muchas cuestiones, los resultados obtenidos a partir del diseño y construcción de modelos realizados con hilos, barras articuladas y papel plegado, además de con programación visual, revelan que es factible y positivo llevar a cabo un buen número de experiencias en contextos docentes actuales.

Referencias

Begiristain Mitxelena, J., 2015. *Sistemas estructurales desplegables para infraestructuras de intervención urbana autoconstruida*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco.

Calvo López, J. y Sanz Alarcón, J. P., 2011. Arquitectura plegable para una década prodigiosa. La obra de Emilio Pérez Piñero y la arquitectura de los años sesenta. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*. 16(17), pp.114-127.

Friedman, M. y Rittberg, C.J., 2021. The material reasoning of folding paper. *Synthese*, 198 (Suppl 26), pp. 6333–6367.

García Martínez, M. y Lacalle García, C., eds., 2015. Catálogo de la exposición *Emilio Pérez Piñero, arquitectura desplegable*. Valencia: UPV.

Hervé, J. M., 2007. Théodore Olivier (1793–1853). *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science: Their Contributions and Legacies*, Part 1, pp. 295-318.

Jackson, P., 2011. *Folding Techniques for Designers: From Sheet to Form*. London: Laurence King Publishing.

Merrifield, C.W., 1872. *A catalogue of a collection of models of ruled surfaces; With an appendix, containing an account of the application of analysis to their investigation and classification*. London: George E. Eyre and William Spottiswoode.

Pérez Belda, E. A. y Pérez Almagro, M. C., 2016. La arquitectura desplegable conmemora los XXV años de paz. 50 Aniversario del Pabellón de Emilio Pérez Piñero. *EGA. Expresión Gráfica Arquitectónica*, 21(28), pp. 146–155.

Pérez Valcárcel, J., 2014. Félix Escrig y las estructuras desplegables. *Quaderns d' Estructures*, 49 (Ejemplar dedicado a Félix Escrig Pallarés). Barcelona: Associació de Consultors d'Estructures ACE, pp. 3-18.

Polo-Blanco, I., 2007. *Theory and history of geometric models*. Groningen: Academic Press Europe.

Puertas del Río, L., 1989. *Estructuras desmontables y desplegables. Estudio de la obra del arquitecto Emilio Pérez Piñero*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Sundara Row, T., 1893. *Geometric exercises in paper folding*. Madras (India): Addison.

Datos biográficos de los autores

Ana González Uriel

Departamento de Ideación Gráfica Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid. ana.g.uriel@upm.es

Arquitecta y doctora, profesora en la Universidad Politécnica de Madrid. Su docencia actual incluye geometría y dibujo de arquitectura, infografía y modelado geométrico. Estudia e investiga sobre geometría de curvas y superficies con métodos gráficos. Así mismo, pertenece al grupo de investigación “Forma y construcción histórica”, donde desarrolla trabajos vinculados al análisis geométrico y constructivo del patrimonio arquitectónico.

Manuel Ramos Martín

Departamento de Ideación Gráfica Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid. m.rmartin@upm.es

Doctor arquitecto por la Universidad de Sevilla especializado en construcción sostenible y obsolescencia energética de edificios con relación al cambio climático. Profesor Asociado en la ETSAM UPM. Paralelamente a la actividad académica, trabaja como arquitecto desarrollando las funciones de jefe de proyectos de ejecución y de codirector de obra de edificios residenciales y terciarios, los cuales se desarrollan íntegramente a través de una metodología BIM.

Licinia Aliberti

Departamento de Ideación Gráfica Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid. licinia.aliberti@upm.es

Arquitecta por la Università degli Studi Roma Tre y doctora por la Universidad Politécnica de Madrid, imparte docencia en el ámbito de la geometría y el dibujo de arquitectura en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Desarrolla trabajos de investigación sobre nuevas tecnologías aplicadas al levantamiento arquitectónico y sobre el análisis geométrico de la arquitectura con especial interés hacia el patrimonio, contando con publicaciones y ponencias en congresos en ámbito nacional e internacional.

María Guillem González-Blanch.

Departamento de Ideación Gráfica Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid. maria.guillem@upm.es

Doctora Arquitecta con mención internacional por la Universidad Politécnica de Madrid. Profesora en la ETSAM UPM, compagina su actividad profesional como arquitecta con la investigación y la docencia relacionada principalmente con el dibujo y el patrimonio arquitectónico y urbano. Forma parte del grupo de investigación “Análisis e Intervención en el Patrimonio Arquitectónico” (AIPA-UPM).

Agradecimientos

El material de las maquetas físicas realizadas en el marco de este trabajo ha sido parcialmente sufragado por el proyecto IE23.0308 de la UPM “Retos con rectas: geometría y diseño de superficies regladas”.