

ANDRÉS MARTÍN-PASTOR

Un retorno a los fundamentos de geometría

The Butterfly Gallery – Helicoidal Surfaces, estrategias geométricas para la fabricación digital

Ph.D. Andrés Martín-Pastor

Universidad de Sevilla.

Departamento de Ingeniería Gráfica.

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. ETSIE.

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción IUACC.

archiamp@us.es

Abstract

Hoy en día, la docencia de la Geometría Descriptiva está sufriendo unos cambios considerables en las Escuelas de Arquitectura del mundo y, a nuestro juicio, es prioritario realizar una importante reflexión y renovación en torno a su enseñanza. Proponemos una estrategia docente donde se conciba el aprendizaje de ‘los fundamentos de geometría’ de la mano de las herramientas digitales. El workshop ‘The Butterfly Gallery–Helicoidal Surfaces’ desarrollado en la Universidade Federal do Rio de Janeiro es un ejemplo de ello, donde se aborda la construcción de un pabellón de madera con superficies helicoidales desarrollables, desde los fundamentos geométricos hasta su fabricación digital y montaje colaborativo.

Introducción

Un ejercicio de análisis crítico de la situación actual, comienza por reflexionar sobre el papel que jugó la Geometría Descriptiva en el pasado, desde sus orígenes a su incorporación al curriculum del arquitecto. Repasaremos cuales fueron las características que hicieron de la Geometría Descriptiva —en su acepción *Mongiana* de ‘Sistema Diédrico’— una ciencia notable en su momento y qué es aquello que ha dejado de aportar esta disciplina hoy en día, sopesando las posibles carencias que el abandono de la Geometría Descriptiva tradicional ha traído a nuestros estudiantes actuales. Eso requiere valorar, tanto lo positivo como lo negativo acerca de la situación en la que nos encontramos tras unos años de evolución de herramientas de diseño digital.

A su vez, no podemos pasar por alto los nuevos escenarios de aprendizaje que han aparecido en torno al pensamiento geométrico, como son los *Laboratorios de Fabricación Digital*. En torno a ellos se están desarrollando estrategias docentes innovadoras donde apoyar una nueva enseñanza de la Geometría Descriptiva mediante las herramientas digitales.

Una vez analizado el panorama en el que nos encontramos, propondremos estrategias docentes de cara a enseñar los ‘fundamentos de geometría’, siempre desde el pensamiento gráfico, apoyándonos en los nuevos medios de control de espacio, rescatando el uso práctico de esta Geometría Descriptiva desde estas herramientas para resolver problemas concretos de la arquitectura.

Finalmente, expondremos la última experiencia desarrollada donde hemos aplicado y evaluado estas teorías. Una experiencia de investigación e innovación docente desarrollada en el curso de Pós-graduação em Arquitetura, como actividade de la pesquisa ‘A Educação do Olhar: apreensão dos atributos geométricos da forma dos lugares’ de la Universidade Federal do Rio de Janeiro. El workshop titulado ‘Butterfly Gallery - Helicoidal Surfaces, Estratégias geométricas para a Fabricação Digital’, ha dado como resultado una instalación arquitectónica (Fig.1) con el mismo nombre de madera laminada, situada en el pórtico de acceso de la Escuela de Arquitectura e Urbanismo de la UFRJ.

Fig. 1. Butterfly Gallery - Helicoidal Surfaces. FAU, Universidade Federal do Rio de Janeiro



Geometría Descriptiva. Éxito y declive de una disciplina

Hasta hace relativamente poco tiempo —antes de la llegada del CAD— en la práctica arquitectónica se seguían utilizando los instrumentos tradicionales del dibujo. La formación del arquitecto estaba ligada a la destreza de un amplio conjunto de saberes gráficos y, dentro de ese variado repertorio, la Geometría Descriptiva (en su acepción *Mongiana*) seguía siendo la herramienta gráfica más rigurosa con la que contaba la mente del arquitecto para resolver cualquier problema geométrico-arquitectónico (Gentil, 1983). No es de extrañar pues, que haya sido una asignatura de notable peso en la historia de la enseñanza de la Arquitectura en España, Italia y Francia, desde el nacimiento de las primeras escuelas de arquitectura hasta hace muy poco tiempo.

Gaspar Monge (1746-1818), en su *Géométrie descriptive* (1798), aportó una codificación científica al sistema de la doble proyección, sistema gráfico ya usado en su época y que se venía trabajando desde tiempos de Piero y Durero. La codificación exhaustiva propuesta por Monge, supuso un mayor grado de abstracción al sistematizarse una gramática gráfica que recorría, no solo objetos reconocibles por la percepción visual, sino también las entidades matemáticas puras como el punto, la recta, el plano, las superficies, etc., por separado y abordando sus intersecciones y desarrollos. En cierto modo, fue una loable estrategia de traducción de los problemas de las abstractas ecuaciones matemáticas al pensamiento gráfico, como se comprueba comparando los textos de álgebra, *Application de l'analyse à la géométrie* (1809) con los de *Géométrie descriptive* (1798), de dicho autor francés.

No olvidemos tampoco, como nos ilustra Sacarovitch (1998), el contexto histórico en el que florece la obra del matemático francés: el momento de máximo refinamiento del corte de la piedra conocida como 'estereotomía', esta vez como disciplina científica. El control absolutamente técnico y científico de las operaciones relativas a la construcción, primero desde un punto de vista de la ingeniería militar, de la ingeniería civil y luego desde la Arquitectura.

La Geometría Descriptiva, lejos de tener como objetivo que el estudiante 'aprendiera a ver el espacio', se presentaba como un instrumento de precisión, de medida y de cálculo: la herramienta más poderosa de su época para poder abordar, desde el pensamiento gráfico, los problemas concretos de las obras de ingeniería militar, de ingeniería civil y de arquitectura. Nuevos materiales como el hierro y el vidrio encontraron en esta disciplina gráfica, el soporte técnico para ser trabajados con soldadura. Se había consolidado una herramienta conceptual, no sólo de cara a la ideación formal preliminar, sino fundamentalmente para concretar dimensionalmente las partes de unas obras que debían ser elaboradas por diferentes sistemas de producción. En definitiva, se intentaba 'producir' de una forma cada vez menos artesanal y más científica e industrial.

El motivo principal por el cual la Geometría Descriptiva ha reducido su presencia de forma natural en nuestros aulas parece evidente: la herramienta en la que se basaba esa idea de controlar el espacio desde el pensamiento gráfico —el Sistema Diédrico— ha dejado de ser el mejor medio de control gráfico del arquitecto y del ingeniero. Las herramientas digitales —que son muchas y variadas— operan de forma más eficiente en el pensamiento gráfico.

Hoy nos podemos considerar ‘post-digitales’ en tanto que los programas de CAD ya no se consideran ‘nuevas tecnologías’ sino instrumentos cotidianos. Éstas han sido creadas y exploradas en sus limitaciones conceptuales en los últimos veinte años, casi al mismo tiempo que surgían nuevos procesadores, softwares, etc. Este proceso de llegada de los medios digitales ha sido investigado por numerosos investigadores del *Architectural Geometry* (Pottmann, 2007, 2013) y todo parece indicar que nos encontramos en los albores de un nuevo paradigma, en la acepción que nos proponía Tomas Kuhn en *La estructura de las revoluciones científicas*: “cuando cambian los paradigmas, hay normalmente transformaciones importantes de los criterios que determinan la legitimidad tanto de los problemas, como de las soluciones propuestas” (Kuhn, 1962:174).

¿Geometría Descriptiva desde las herramientas digitales? Problemas de nomenclatura

La denominada ‘inercia histórica’, aflora de forma acentuada y controvertida en los procesos de cambio. Esta inercia opera no solamente desde el punto de vista de la forma, o los contenidos formales, sino también desde el uso de las palabras y los significados de las mismas. El lenguaje es algo vivo, y como todo proceso de cambio, será la aceptación general la que —a la larga— otorgue validez a la variación que se propone.

El uso del término ‘Geometría Descriptiva’ ha estado vinculado inicialmente a los ambientes técnicos universitarios europeos —fundamentalmente al francés, italiano, español y portugués— que vinculaban el conjunto de objetivos de la disciplina, con el uso y manejo de una herramienta: el ‘Sistema Diédrico’. No era posible concebir una Geometría Descriptiva fuera del Sistema Diédrico ya que una cosa casi implicaba la otra.

Durante los últimos años de incorporación de las herramientas digitales a la enseñanza de Geometría para la arquitectura, este maridaje tradicional de significado ha sido imposible de romper, hasta el punto que la obsolescencia del Sistema Diédrico como Sistema de Representación ha supuesto el derrumbe —casi total— de la enseñanza de la Geometría Descriptiva, algo que ha ocurrido de forma generalizada en las Escuelas de Arquitectura españolas.

Pero los fines y objetivos de la ‘Geometría Descriptiva’ de Monge, eran: abordar, desde el pensamiento gráfico, los problemas concretos de las obras de ingeniería militar, de ingeniería civil y de arquitectura; controlar de forma absolutamente técnica y precisa las operaciones relativas a la construcción; y producir de forma menos artesanal y más industrializada, y todos ellos siguen absolutamente vigentes en la actualidad, en la época post-digital en la que nos encontramos. Las herramientas digitales colaboran en alcanzar todos estos objetivos, más que cualquier otra herramienta tradicional —conceptual o mecánica— por lo que no debería haber ninguna contradicción en concebir una Geometría Descriptiva desde las herramientas digitales.

El uso de las herramientas de control del espacio y el estudio de la Geometría desde el pensamiento gráfico

Se ha venido confundiendo y mezclando la enseñanza del manejo de las herramientas con el estudio de las habilidades mentales conducentes a los fines arquitectónicos en los cuales la Geometría, a través del pensamiento gráfico, impone su protagonismo. Esa confusión no es una cuestión novedosa, viene de muy atrás y estaba ya presente en la enseñanza de los Sistemas de Representación Tradicionales para el estudio de la Geometría. De acuerdo con Ricardo Migliari: “Descriptive geometry has this capability too [representation], but it is only one among several. Indeed, descriptive geometry is, first of all, the science that teaches to construct shapes of three dimensions, by means of a graphic solution that simultaneously controls the metric, formal and perceptive aspects” (2012:568).

Los Sistemas de Representación son las herramientas de visualización y los recursos gráficos con los que tradicionalmente se ha contado para definir, representar y controlar la posición los objetos en el espacio. Como herramientas que son, podemos conocer perfectamente su manejo sin saber nada de su aplicación en geometría, arquitectura o ingeniería. Podemos saber usar perfectamente el Sistema Diédrico sin saber luego que hacer con él, ni sus bondades o limitaciones para el estudio de tal o cual superficie geométrica.

La Geometría —aplicada al estudio de la Arquitectura e Ingeniería— aborda y profundiza en las propiedades de los objetos en tanto a su forma (formas geométricas), su clasificación y las relaciones entre ellas. La Geometría trata de desarrollar axiomas, principios y teoremas, como el ‘Teorema de Dandelin’, que relaciona el cono de revolución, la esfera inscrita tangente a un plano de corte y el foco de la cónica sección; o los ‘Teoremas de Intersecciones de Cuádricas’, etc. El estudio de la geometría se puede enfocar desde el álgebra, desde la expresión gráfica (pensamiento gráfico), etc., y su profundidad y grandeza está por encima de cualquier sistema de representación. Es territorio común de numerosas disciplinas, entre ellas la arquitectura. Actualmente se denomina Geometría Arquitectónica o *Architectural Geometry* a estos saberes geométricos (matemáticos, gráficos, programación algorítmica... etc.) que están al servicio de la Arquitectura.

Si hablamos únicamente de pensamiento gráfico (no matemático, ni algebraico, ni algorítmico) ayudado por las herramientas de control gráfico (digamos ‘Medios de Control Gráfico’) para estudiar Geometría, entonces hablamos de Geometría Descriptiva. Esta disciplina histórica ha tenido la capacidad de enseñar, en las Escuelas de Arquitectura, unos sólidos fundamentos geométricos, una gramática básica que opera con razonamientos simples (desde la máxima abstracción del punto y la línea) y permiten ser extrapolados a cuerpos y superficies geométricas más sofisticadas a través de una secuencia lógica.

Sin embargo, y de forma contradictoria, a medida que han crecido el número de herramientas digitales de control del espacio, también se han ido olvidando los fundamentos geométricos con los que manejarse dentro de cualquier tipo de razonamiento de cierta complejidad. Una mirada sobre la situación actual, pone de manifiesto las grandes carencias en ‘fundamentos de geometría’ en la que se encuentran los estudiantes en las Escuelas de Arquitectura (en España), no solo de los cursos iniciales de

su formación sino, de forma más preocupante, en los más avanzados. A la vez que se ha producido esta situación de desconocimiento básico en el currículum académico, han ido proliferando toda una serie de cursos de softwares avanzados para estudiantes que, aunque bien formados en las herramientas informáticas, carecían de los más generales fundamentos geométricos para desarrollarlos.

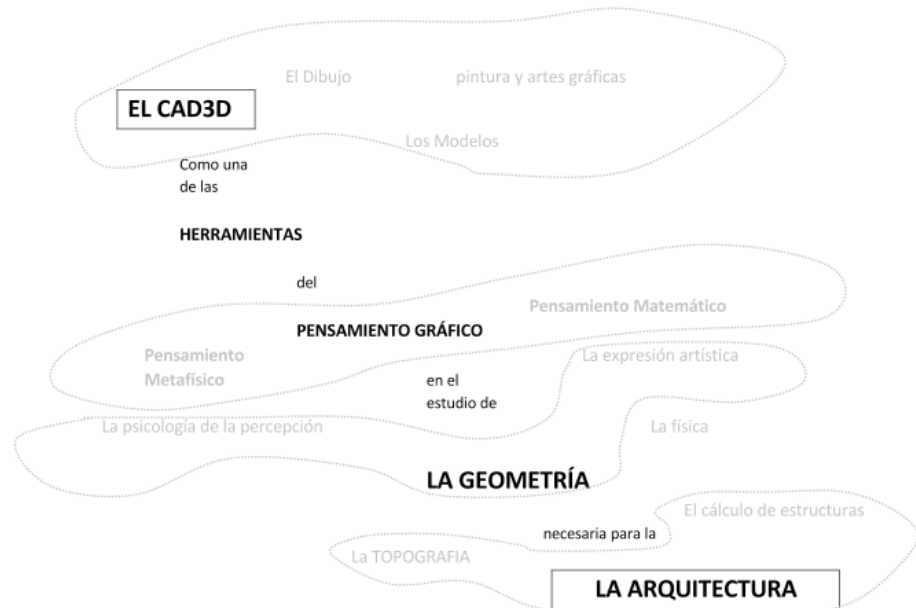
La Geometría Descriptiva tradicional —la de nuestros tratados y manuales— de forma coherente al sistema de representación de su época, ha contribuido mucho a la sistematización de los ‘fundamentos de geometría’, y dicho material sigue siendo un referente válido para ser reinterpretado y abordado a la luz de las herramientas digitales. Existen ahora mejores herramientas para controlar, desde el pensamiento gráfico, la geometría subyacente en la arquitectura, pero todavía queda por construir un ‘corpus’ estructurado donde los fundamentos estén dispuestos de forma sistematizada para su enseñanza desde esas herramientas digitales. Quizá nuestro mayor reto como profesores de Geometría Descriptiva aplicada a la Arquitectura y la Ingeniería.

La geometría que es necesaria para la Arquitectura

En los últimos quince años ha surgido un complejo debate acerca de la conflictiva cuestión: ¿Qué geometría es necesaria hoy para la Arquitectura? Este tema ha sido abordado en numerosos congresos de expresión gráfica (como los congresos EGA o Apega); los de Geometría Descriptiva (Aproged) e informática gráfica (como aCAA-De o Sigradi) tampoco han sido ajenos a este enfoque; así como ha sido un debate abiertamente tratado en revistas que abordan la relación entre la arquitectura y las matemáticas, como ‘Nexus’ (Tafteberg et al., 2014:505–516), o revistas del ámbito de la educación superior y arquitectura.

Lo que empezó siendo una crisis metodológica en la enseñanza de una disciplina, a la que cada cual fue enfrentándose con sus propios recursos y decisiones —a veces improvisadas ante la ausencia de reflexión crítica— a día de hoy, existen centenares de publicaciones científicas sobre este tema. Nosotros vamos a intentar responder a esta cuestión desde nuestra experiencia docente e investigadora y teniendo en cuenta un enfoque metodológico propio. El problema sobre ‘qué geometría se considera necesaria para la arquitectura’ lo situamos, al final de una larga secuencia de aproximación hermenéutica al fenómeno de la creación y producción arquitectónica en su más amplio aspecto (Fig.2). En primer lugar abordaremos las herramientas digitales —dentro del conjunto de herramientas que las que disponemos— destacando en qué se diferencian sustancialmente respecto a las tradicionales, en tanto que permiten superar al paradigma anterior.

Fig. 2. Aproximación hermenéutica al fenómeno de la creación y producción de arquitectura, desde las herramientas, el pensamiento gráfico y la geometría.



Con las herramientas digitales hemos superado el problema de la representación de la tridimensionalidad en un soporte plano; así como el problema de la precisión en los trazados gráficos. También disponemos de una serie de automatismos a nuestro favor que aceleran el proceso de visualización y minimizan la energía mental usada en los procedimientos auxiliares intermedios, incorporando la potencia de visualización de la máquina, a nuestra mente (y a nuestra imaginación, abriendo así nuevas relaciones asociativas).

Respecto en las particularidades de lo que se ha denominado 'pensamiento gráfico', éste se diferencia de otros tipos de pensamiento como el 'matemático' u otros, porque en él operan la información gráfica y los procesos de construcción de la misma. Éstos intervienen de forma activa en la construcción del dibujo, el modelo o la imagen, y el estado final de dicha construcción gráfica —que se retroalimenta de la visualización— es justamente la conclusión de dicho razonamiento. Es un pensamiento que necesita de la presencia física de imágenes codificadas para que cada paso pueda seguir produciéndose dentro del razonamiento global. Por el contrario, la ausencia de dichas imágenes, o un error en la codificación de las mismas, impediría el flujo de las ideas. Sobre todo, es un pensamiento que no es verbal, fluye por otras vías; los intentos de explicar dicho razonamiento desde lo verbal y sin ayuda de lo gráfico, resultan inviables.

Profundizando en la última parte del proceso ilustrado en la figura 2, abordamos la relación que se produce entre geometría y la arquitectura. Pero teniendo en cuenta todo lo anterior, la pregunta completa sería: ¿Qué geometría creemos necesaria dominar para su uso en arquitectura, teniendo en cuenta que vamos a abordarla desde el pensamiento gráfico y con las herramientas digitales de nuestra época?

A la pregunta responderemos de la misma manera que se hacía en sus comienzos fundacionales del siglo XIX: "aquella que aborda, desde el pensamiento gráfico, los problemas concretos de la arquitectura; ayuda a controlar de forma absolutamente técnica y precisa las operaciones relativas a la construcción y sirve para producir de forma menos artesanal y más industrializada [más eficiente]".

Los 'fundamentos de geometría' son la gramática que nos permite operar con razonamientos geométricos más elevados que finalmente sirven para articular problemas y soluciones concretas en arquitectura. Hacer uso de esa capacidad y desarrollarla para

fines prácticos es el fin último de la enseñanza de la Geometría Descriptiva. Nosotros hemos sintetizados cinco fases del proceso arquitectónico donde el conocimiento de la geometría está fuertemente presente. Estas fases están muy relacionadas con la prefabricación, y quizá sean los Laboratorios de Fabricación Digital —Fablabs— los escenarios más apropiados para vincular todas las fases de este proceso en el ámbito docente y de investigación:

‘Geometría y creatividad’. Hablamos de la idea geométrica del proyecto. En la tradición del dibujo arquitectónico podría estar relacionado con el boceto. En diseño paramétrico hablamos del algoritmo generador de la forma.

‘Geometría, definición gráfica y el control de la forma’. El dibujo de creación, o el modelo 3D como sustituto del objeto, que podría estar relacionado con la definición que exige un proyecto básico. Existe todo un conocimiento geométrico puesto al servicio de esa definición formal.

‘Geometría de precisión y de detalles’. La definición geométrica de cada una de las partes de un objeto arquitectónico y las relaciones de conjunción o ensamblaje de las partes entre sí. Es un nivel de precisión necesario para la creación de un despiece o la creación de un prefabricado.

‘Geometría, mediciones y valoración económica’. La geometría como herramienta de medición.

‘Geometría, construcción y montaje’. Es la geometría necesaria en la definición gráfica de los sistemas de montaje, la que explica los procesos de ensamblaje y la Geometría de los sistemas de control.

En este sentido, el desafío es planificar estas cinco fases a través de un proyecto docente y disponer de un entorno de trabajo apropiado para su puesta en funcionamiento. Como ya hemos adelantado, nuestra propuesta va a consistir en abordar desde la Geometría Descriptiva —y usando herramientas digitales— las fases de diseño, fabricación digital y montaje colaborativo de un pabellón de madera. Esta experiencia es aprovechada como oportunidad para la aplicación de un modelo teórico y como validación del mismo.

La importancia de los ‘fundamentos en geometría’ en la era post-digital. La Investigación geométrica

Abordar un proyecto de esta naturaleza nos obliga a un triple estudio: abordar los ‘fundamentos de geometría’, los ‘fundamentos del software’ y los ‘fundamentos de la fabricación digital’. No se trata únicamente de un ejercicio de Geometría aplicado a un proceso constructivo. Para cumplir los objetivos la red de conocimientos, habilidades y destrezas, necesita crecer en complejidad, asumiendo las competencias conceptuales (teoría y fundamentos), competencias instrumentales (herramientas de diseño) y las competencias productivas (herramientas de fabricación).

Si relacionamos las cinco fases anteriormente comentadas, con los procesos básicos de fabricación digital, observamos que coinciden básicamente con procesos de ‘diseño’, ‘fabricación’ y ‘montaje’ que nos encontramos en la fabricación industrializada. Cada uno de estos procesos pueden estar concebidos por equipos perfectamente au-

tónomos, guardando una estrecha similitud con los procesos de diseño industrial. La experiencia de diseño, fabricación y montaje de un pabellón desde los fundamentos geométricos, se convierte también en un ejercicio de comunicación y de coordinación intergrupala, donde los estudiantes pueden trabajar las competencias necesarias del trabajo en equipo.

No podemos olvidar otros aspectos importantes que se incorporan a esta fórmula de trabajo, que es concebir la herramienta digital como un laboratorio de investigación geométrica donde, de forma empírica, se investiga las propiedades geométricas y estructurales de ciertas superficies que vamos a poner en práctica en el proyecto. De esta manera se añade al planteamiento inicial una variable que trasciende lo puramente docente, para convertir la experiencia en un taller experimental de investigación (Casale, 2015).

Hasta la fecha hemos desarrollado diferentes investigaciones en el campo de las superficies geométricas con ayuda de las tecnologías digitales, iniciando el recorrido por los ‘Teoremas de Cuádricas’ que pusimos en práctica con la instalación ‘The Caterpillar Gallery’ en la Universidad de Sevilla (Narváez y Martín-Pastor 2014:309) y ‘The Cocoon’ en la Universidad Nacional de Colombia (Martín-Pastor et al., 2014). También hemos abordamos el estudio de las superficies desarrollables, específicamente las superficies de igual pendiente, con el pabellón ‘SSFS Pavilion - Sante Fe’ (Sigradi 2016) y una adaptación mejorada del mismo diseño con el pabellón construido en Sevilla para el evento de ‘La noche Europea de los Investigadores’. En nuestro último taller hemos desarrollado las superficies helicoidales desarrollables y su uso en la construcción de pabellones de madera con el Butterfly Gallery – Helicoidal Surfaces en la Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Butterfly Gallery - Helicoidal Surfaces. Estrategias geométricas para la fabricación digital

El taller se ha titulado: ‘Butterfly Gallery - Helicoidal Surfaces, Estratégias Geométricas para a Fabricação Digital’, y ha sido impartido como actividad de la pesquisa ‘A Educação do Olhar: apreensão dos atributos geométricos da forma dos lugares’, en el Programa de Pós-graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio de Janeiro - Proarq, durante el mes de agosto de 2015. Mi participación se debe a la generosa invitación de la profesora María Angela Dias, coordinadora del mismo. La actividad también ha contado con el apoyo de los profesores, Andrés Martín Passaro, Gonçalo Castro Henriques, Danusa Gani, Mauro Chiarella, Raphael Marconi, entre otros muchos de la FAU UFRJ, así como del equipo de Lamo3D y la colaboración de Fablab Sevilla.

La estrategia docente del workshop ha planteado un recorrido a un grupo de estudiantes de Arquitectura a través de un programa teórico-práctico de dos semanas. En ellas se han abordado las competencias en ‘fundamentos de geometría’, junto a las competencias del uso y manejo de las herramientas digitales a partir de leyes de generación geométrica y la capacidad exploratoria de la forma, gracias a algoritmos paramétricos. Éstos se pusieron en práctica en un pequeño taller de experimentación proyectual, donde cada grupo de estudiantes elaboró su propio proyecto de pabellón. Finalmente, un ejercicio guiado contempló los aspectos constructivos y las competencias en fabricación digital, que concluyó con la construcción física del pabellón titulado: The Butterfly Gallery – Helicoidal Surface.

En los primeros días del workshop se fueron trabajando las cuestiones teóricas, los fundamentos geométricos que deben conocerse para trabajar con superficies desarrollables y con la geometría del helicoides. Los parámetros que determinan la forma de la hélice del cual proviene: el paso, radio de la hélice, etc. y las condiciones de la familia de rectas que, apoyándose en ella, generan un helicoides desarrollable (Fig.3). Todas estas lógicas fueron trabajadas, primero como una secuencia de operaciones gráficas dibujadas mediante el software *Rhino*, que después fueron trasladadas a la forma de algoritmo en *Grasshopper*, como si fuera una transcripción literal de los mismos razonamientos geométricos.

Fig. 3. Representación gráfica y parametrización de una hélice a partir de las variables 'eje', 'paso' y 'radio'. Representación del helicoides desarrollable que se apoya en ella.



Pasar de la lógica gráfica del programa de CAD a la programación paramétrica, tiene su dificultad cuando se dispone de tan solo unos días para ello y unos estudiantes — muchos de los cuales— se encontraban con este medio por primera vez. No obstante, la clave del éxito del taller residió en que entendimos que es la lógica del pensamiento gráfico, unida al conocimiento geométrico, la que estructura la programación algorítmica y no al revés (programar sin pensamiento gráfico previo sería como dibujar 'de memoria' y 'a oscuras'). El algoritmo resultante permite generar un helicoides desarrollable con sus diferentes variables formales perfectamente parametrizadas. La gran aportación del diseño paramétrico consiste en que permite construir no solo un diseño (una solución), sino una familia entera de soluciones que comparte la misma ley de generación geométrica inicial.

En la parte de experimentación de la forma, los alumnos pudieron explorar esta superficie para sus propios fines compositivos y proyectuales. La construcción del algoritmo ha formado parte de la propia creación arquitectónica, en el sentido de que se ha diseñado una herramienta 'a medida' que nos ha permitido explorar y manipular la forma geométrica hasta nuestros fines, convirtiendo una superficie abstracta en un verdadero proyecto (Fig. 4). Una herramienta que, haciendo uso de sencillos 'fundamentos de geometría', nos ha permitido llevar el pensamiento gráfico —más allá de los límites de las herramientas tradicionales— hacia un 'pensamiento gráfico avanzado'.

Fig. 4. La profesora María Angela, revisando cada proyecto. Trabajos realizados por los estudiantes del Workshop.



La geometría de superficies desarrollables permite que cada una de las superficies helicoidales que conforman el pabellón, puedan ser desarrollados en el plano en una única lámina de madera. La superficie, con ayuda del equipo de montaje, se curva en frío adquiriendo la forma helicoidal en el espacio. Cada una de estas superficies es un fragmento de helicoide distinto que habrá que atar, o coser entre sí, mediante bridas de nylon para que adquiera rigidez el conjunto.

Una vez que se definió el proyecto básico común para desarrollar entre todos los asistentes del workshop, pasamos a definir geoméricamente cada uno de los componentes del pabellón (podríamos decir el proyecto de ejecución). Para ello fue fundamental conocer las dimensiones estandarizadas de los paneles de madera de la industria local, así como las características físico-mecánicas de la madera, el radio mínimo de curvatura de la misma, las dimensiones de tornillos y tuercas para clavar, la tipología de los mismos, diámetros de arandelas, etc. y tener todos estos aspectos controlados previamente al proceso de despiece del pabellón, que es un proceso geométrico de gran complejidad, donde se ponen de manifiesto multitud de competencias en Geometría Descriptiva.

La superficie continua de cada uno de los anillos helicoidales se transformó en un conjunto piezas a mecanizar con fresadora CNC, que irían solapadas y mecanizadas con todas las perforaciones necesarias para tornillos y bridas de nylon. Por otro lado, el atado a la plataforma horizontal donde descansaría el pabellón se realizó mediante

unas cartelas de madera de 3 cm, todas distintas, que se adaptan perfectamente a la geometría de la superficie en su encuentro con ella. Toda esta información geométrica pasaría a formar parte de los archivos de corte necesarios para la fabricación digital. (Fig.5).

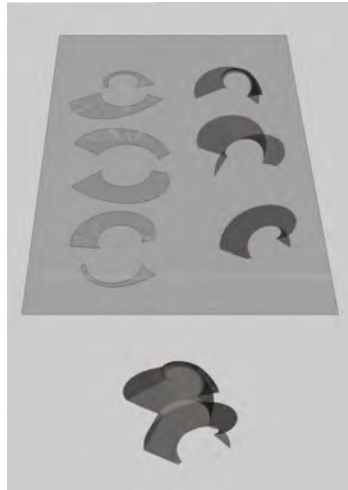


Fig. 5. Modelo en Rhino del Pabellón donde podemos ver el desarrollo plano de cada uno de los anillos.



Fig. 6. Simulación de la construcción del pabellón a partir de una maqueta a escala 1:8 donde se recogen todos y cada uno de los componentes.

Una vez que quedaron definidos los diferentes componentes del pabellón, se pasó a construir un simulacro del mismo con una maqueta a escala 1:8, donde se hicieron las pruebas de verificación de cada una de las piezas y de la estabilidad general del conjunto y las pruebas de simulación y coordinación de los procesos de montaje (Fig.6). Una vez realizadas, se dio paso a la fabricación de cada componente a escala 1:1, terminando la fase de diseño y comenzando la fase de producción, en nuestro caso llevada a cabo por los miembros de Lamo3D, con la colaboración de Foco Design.

El montaje del pabellón fue una de las fases más emblemáticas del proceso, por la alta carga emocional que tuvo finalizar un trabajo coordinado y colaborativo de esta naturaleza (Fig.7). Pero no podemos olvidar que se trató, también, de un trabajo de precisión donde tuvimos que prever ciertas tolerancias en los ajustes finales y situaciones conflictivas en el proceso. Maximizar el rendimiento, con un reparto equitativo del trabajo conforme a las herramientas que se disponen (atornilladores eléctricos, etc.) fue una de las claves del éxito de esta fase de montaje.

Fig. 7. Montaje del Pabellón a escala 1:1. FAU, Universidade Federal do Rio de Janeiro.



A modo de conclusiones

Dentro de los objetivos docentes era prioritario producir una vinculación entre los conocimientos de ‘fundamentos de geometría’ y su aplicación en arquitectura real. En ese sentido el taller ha sido un éxito tanto si lo valoramos en cada parte, como en el resultado arquitectónico final: el Butterfly Gallery. Hemos abarcado casi todas las fases de la relación entre geometría y proceso arquitectónico. Entre ellas ha tomado especial relevancia la ‘geometría y creatividad’, ‘geometría, definición gráfica y el control de la forma’ y —todo lo posible en el tiempo que tuvimos— ‘Geometría de precisión y de detalles’.

Los tres procesos productivos asociados a la geometría y la fabricación digital, como son: el ‘proceso de diseño’, el ‘proceso de fabricación’ y el ‘proceso de montaje’, han quedado claramente expuestos durante el workshop y creemos que ha sido un acierto delegar las tareas del ‘proceso de producción’ al equipo de Lamo3D, para centrarnos con los estudiantes en las fases inicial y final (diseño y montaje), dejando expresa constancia que se trataban de tres procesos delegables en tres grupos de trabajo diferentes.

Respecto al desarrollo del taller, creemos que ha sido fundamental la motivación intrínseca que disponían los alumnos y el equipo de profesores colaboradores. El éxito de la experiencia ha dependido en gran parte de ello, junto a la capacidad de dinamización, coordinación entre equipos, experiencia previa, el control y la medida de tiempos y esfuerzos, etc. que disponían todos los miembros del equipo. Por todos estos motivos, creemos que ha sido un modelo ejemplar de experiencia de innovación docente.

Dentro de las cuestiones relativas a la investigación, el taller ha sido un laboratorio de experimentación práctica y teórica. Se ha puesto de manifiesto cómo, a través de las herramientas digitales, podemos *redescubrir* superficies geométricas poco usadas en arquitectura —pero presentes en los tratados y manuales de geometría— y darle un uso novedoso en la producción arquitectónica actual.

Se ha avanzado en la parametrización de una familia de superficies —los helicoides desarrollables— a través de la herramienta *Grasshopper*, cuando estas superficies son extremadamente complejas de desarrollar por medios CAD3D convencionales (incluido *Rhinoceros*) y prácticamente imposibles por los tradicionales. Con ello, se avanza en el estudio y aplicación de las superficies desarrollables en Arquitectura, dejando la puerta abierta a todo un mundo de exploración formal a través de estas tecnologías. También se ha avanzado en los aspectos constructivos y de montaje de arquitectura efímera —concretamente la arquitectura de pabellones de madera— con unas características genuinas de ensamble (por tornillos y solapes) y atado (por cosido con bridas de nylon) de fácil montaje, que ya había sido experimentada en nuestros pabellones anteriores, y que en esta experiencia ha sido perfeccionada.

Agradecimientos

Agradezco a la profesora Maria Angela Dias, que con su voluntad ha hecho realidad este taller; a Juan Expósito por el diseño conjunto del Butterfly_Gallery; a los profesores Andres Martin Passaro, Gonçalo Castro Henriques y los chicos de LAMO, artífices de la producción y del éxito del workshop; al equipo FABLAB Sevilla; a la profesora Danusa Chini Gani, a Raphael Marconi, a Mauro Chiarella y al resto de profesores de

la UFRJ por la ayuda constante; a todos los alumnos que han asistido al taller sin cuyo esfuerzo no hubiera sido posible la experiencia; y finalmente, con afecto, a la profesora Gabriela Celani, la persona que encendió la chispa al presentarme a María Angela en Montevideo, en noviembre de 2014.

Referencias

CASALE, Andrea; et al. Surfaces: Concept, Design, Parametric Modeling and Prototyping. *Nexus Network Journal* 15, vol. 2 (2013), pp. 271-283.

GENTIL BALDRICH, José María. Sobre arquitectura y ciencia: la introducción de la Geometría Descriptiva en España. En: *Cuadernos de Construcción*, vol. 4, Sevilla, 1983, pp. 41-56.

CHIARELLA, Mauro; GARCÍA-ALVARADO, Rodrigo. Folded Compositions in Architecture: Spatial Properties and Materials. *Nexus Network Journal* 17, vol. 2 (2015), pp. 623-639.

KUHN, Tomas S. *La estructura de las revoluciones científicas*. Chicago: Chicago Press, 1962 [primera edición].

MARTIN-PASTOR, Andrés; TORRES-HOLGUIN, Jorge; NARVAEZ-RODRIGUEZ, Roberto; GALINDO-DIAZ, Jorge. Los workshops de geometría en Cad3D y prefabricación digital como estrategia docente en la enseñanza de la geometría para la arquitectura. En: *Proceedings of the XVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics*. [Blucher Design Proceedings, v.1, n.8.] São Paulo: Blucher, 2014, pp. 213-216.

MIGLIARI, Riccardo. Descriptive Geometry: From its Past to its Future. *Nexus Network Journal* 14, vol. 3, (2012), pp. 555-571.

MONGE, Gaspard. *Géométrie descriptive*. Paris: Baudouin, 1798.

NARVÁEZ-RODRÍGUEZ, Roberto; MARTÍN-PASTOR, Andrés; AGUILAR-ALEJANDRE, María. The Caterpillar Gallery: Quadratic Surface Theorems, Parametric Design and Digital Fabrication. En: *Advances in Architectural Geometry 2014*, eds. Philippe Block et al. London: Springer (2014), pp. 309-322.

POTTMANN, Helmut. Architectural Geometry and Fabrication-Aware Design. *Nexus Network Journal* 15, vol. 2 (2013), pp. 195-208.

POTTMANN, Helmut; ASPERL, Andreas; HOFER, Michael; KILIAN Axel. *Architectural Geometry*. Exton: Bentley Institute Press, 2007.

SACAROVITCH, Joël. Épures d'architecture. De la Coupe del pierres à la géométrie descriptive, XVIe-XIXe siècles. En: *Science Network. Historical Studies* vol. 21. Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser, 1998.

TAFTEBERG JAKOBSEN, Ivan; MATTHIASSEN, Jesper. Descriptive Geometry and/or Computer Technology? What Mathematics is required for Doing and Understanding Architecture? *Nexus Network Journal* 16, vol. 2 (2014), pp. 505-516.

CADERNOS
PROARQ 25

ANDRÉS MARTÍN-PASTOR

Um retorno aos Fundamentos da Geometria

The Butterfly Gallery – Superfícies Helicoidais Estratégias
Geométricas para a Fabricação Digital

Ph.D. Andrés Martín-Pastor

Universidade de Sevilha.

Departamento de Engenharia Gráfica.

Escola Técnica Superior de Engenharia da Edificação. ETSIE.

Instituto Universitário de Arquitetura e Ciências da Construção IUACC.

archiamp@us.es

Resumo

Hoje em dia, a docência de Geometria Descritiva está sofrendo mudanças consideráveis nas Escolas de Arquitetura do mundo e, em nosso entendimento, é prioritário realizar uma importante reflexão e renovação acerca de seu ensino. Propomos uma estratégia docente onde se conceba a aprendizagem dos “fundamentos da geometria” em conjunto com as ferramentas digitais. O workshop “The Butterfly Gallery–Helicoidal Surfaces”, desenvolvido na Universidade Federal do Rio de Janeiro, é um exemplo disso, onde se aborda a construção de um pavilhão de madeira com superfícies helicoidais desenvolvíveis, indo dos fundamentos geométricos até sua fabricação digital e montagem colaborativa.

Introdução

Um exercício de análise crítica da situação atual começa por uma reflexão sobre o papel desempenhado pela Geometria Descritiva no passado, desde suas origens até sua incorporação no currículo do arquiteto. Reveremos quais foram as características que fizeram da Geometria Descritiva — em sua acepção *mongiana* de “Sistema Diédrico” — uma ciência notável em sua época e o que deixou de ser aportado por esta disciplina hoje em dia, sopesando as possíveis carências que o abandono da Geometria Descritiva tradicional trouxe para os nossos atuais estudantes. Isso requer avaliar tanto o positivo quanto o negativo a respeito da situação na qual nos encontramos após alguns anos de evolução das ferramentas de desenho digital.

Por sua vez, não podemos ignorar os novos contextos de aprendizagem que surgiram em matéria de pensamento geométrico, como o são os *Laboratórios de Fabricação Digital*. À sua volta, estão se desenvolvendo estratégias docentes inovadoras, permitindo apoiar um novo ensino da Geometria Descritiva, por meio de ferramentas digitais.

Tão logo for analisado o panorama no qual nos encontramos, proporemos estratégias docentes com vistas a ensinar os “fundamentos da geometria”, sempre a partir do pensamento gráfico, com base nos novos meios de controle do espaço, resgatando o uso prático dessa Geometria Descritiva a partir dessas ferramentas, a fim de resolver problemas concretos da arquitetura.

Por fim, apresentaremos a última experiência desenvolvida, onde aplicamos e avaliamos essas teorias. Uma experiência de investigação e inovação, desenvolvida no curso de Pós-graduação em Arquitetura, como atividade da pesquisa “A Educação do Olhar: apreensão dos atributos geométricos da forma dos lugares”, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O workshop intitulado “Butterfly Gallery - Helicoidal Surfaces, Estratégias geométricas para a Fabricação Digital” teve como resultado uma instalação arquitetônica (Fig.1), de mesmo nome e em madeira laminada, situada no pórtico de acesso da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ.

Fig. 1. Butterfly Gallery - Helicoidal Surfaces. FAU, Universidade Federal do Rio de Janeiro



Geometria Descritiva. Sucesso e declínio de uma disciplina

Faz relativamente pouco tempo — antes da chegada do CAD —, continuavam sendo utilizados, na prática arquitetônica, os instrumentos tradicionais de desenho. A formação do arquiteto estava vinculada ao domínio de um amplo conjunto de saberes gráficos e, dentro desse repertório variado, a Geometria Descritiva (em sua acepção *mongiana*) continuava sendo a ferramenta gráfica mais rigorosa com que contava a mente do arquiteto para resolver qualquer problema geométrico-arquitetônico (Gentil, 1983). Não é de se estranhar, portanto, que tenha sido uma disciplina de peso considerável na história do ensino da Arquitetura na Espanha, na Itália e na França, desde o nascimento das escolas de arquitetura até muito pouco tempo atrás.

Gaspar Monge (1746-1818), em sua *Géométrie descriptive* (1798), trouxe uma codificação científica ao sistema de dupla projeção, sistema gráfico já usado na sua época, e que vinha sendo trabalhado desde os tempos de Piero e Dürero. A exaustiva codificação proposta por Monge supôs um maior grau de abstração ao sistematizar uma gramática gráfica que recorria não só a objetos reconhecíveis pela percepção visual, como também a entidades matemáticas puras, como o ponto, a reta, o plano, as superfícies, etc., isoladamente, além de abordar suas interseções e desenvolvimentos. De certo modo, foi uma louvável estratégia de tradução dos problemas referentes a equações matemáticas abstratas ao pensamento gráfico, como fica comprovado na comparação entre os textos de álgebra, *Application de l'analyse à la géométrie* (1809) e os de *Géométrie descriptive* (1798), de referido autor francês.

Não esqueçamos, tampouco, como o ilustra Sacarovitch (1998), o contexto histórico em que a obra do matemático francês floresce: o momento de máximo refinamento do corte de pedra conhecido como “estereotomia”, como disciplina científica. O controle absolutamente técnico e científico das operações relativas à construção, primeiramente, do ponto de vista da engenharia militar e da engenharia civil, e, em seguida, a partir da Arquitetura.

A Geometria Descritiva, longe de ter como objetivo que o estudante “aprendesse a ver o espaço”, apresentava-se como um instrumento de precisão, medida e cálculo: a ferramenta mais poderosa de sua época para se conseguir abordar, a partir do pensamento gráfico, os problemas concretos das obras de engenharia militar, engenharia civil e arquitetura. Novos materiais como o ferro e o vidro encontraram suporte técnico nessa disciplina gráfica, para serem trabalhados com desenvoltura. Consolidou-se uma ferramenta conceitual não só com vistas à ideação formal preliminar, como também, fundamentalmente, para concretizar dimensionalmente as partes de certas obras, que tinham de ser elaboradas por diferentes sistemas de produção. Em definitivo, tentava-se “produzir” de forma cada vez menos artesanal e mais científica e industrial.

O principal motivo pelo qual a Geometria Descritiva reduziu, de forma natural, a sua presença em nossas aulas parece evidente: a ferramenta em que se baseava essa ideia de controlar o espaço a partir do pensamento gráfico — o Sistema Diédrico — deixou de ser o melhor meio de controle gráfico do arquiteto e do engenheiro. As ferramentas digitais — que são muitas e variadas — operam de modo mais eficiente no pensamento gráfico.

Hoje, podemos considerar-nos “pós-digitais”, posto que os programas de CAD já não são considerados “novas tecnologias”, e sim, instrumentos cotidianos. Ao longo dos últimos vinte anos, as mesmas foram criadas e exploradas em suas limitações conceituais, quase ao mesmo tempo em que surgiam novos processadores, softwares, etc. Esse processo de aparição dos meios digitais foi investigado por muitos pesquisadores do *Architectural Geometry* (Pottmann, 2007, 2013) e tudo parece indicar que nos encontramos diante do amanhecer de um novo paradigma, na acepção que nos era proposta por Tomas Kuhn, em *La estructura de las revoluciones científicas*: “quando mudam os paradigmas, acontecem, normalmente, transformações importantes nos critérios que determinam a legitimidade tanto dos problemas quanto das soluções propostas” (Kuhn, 1962:174).

A Geometria Descritiva a partir das ferramentas digitais? Problemas de nomenclatura

A chamada “inércia histórica” aparece nos processos de transformação de modo acentuado e controvertido. Essa inércia opera não só do ponto de vista formal, ou dos conteúdos formais, como também no uso das palavras e de seus significados. A linguagem é algo vivo e, como em qualquer processo de mudança, será a acepção geral que poderá — a longo prazo — dar validade à variação proposta.

O uso do término “Geometria Descritiva” esteve inicialmente vinculado aos ambientes técnicos universitários europeus — fundamentalmente, o francês, o italiano, o espanhol e o português —, que vinculavam o conjunto de objetivos da disciplina ao uso e manuseio de uma ferramenta: o “Sistema Diédrico”. Não era possível conceber uma Geometria Descritiva fora do Sistema Diédrico, já que uma coisa quase implicava na outra.

Durante esses últimos anos de incorporação das ferramentas digitais ao ensino da Geometria para arquitetura, foi impossível romper esse tradicional emparelhamento semântico, a tal ponto que a obsolescência do Sistema Diédrico como Sistema de Representação acarretou a derrubada — quase absoluta — do ensino da Geometria Descritiva, tendo isto ocorrido de forma generalizada nas Escolas de Arquitetura espanholas.

No entanto, os fins e os objetivos da “Geometria Descritiva” de Monge eram: abordar, a partir do pensamento gráfico, os problemas concretos das obras de engenharia militar, engenharia civil e arquitetura; controlar, de forma absolutamente técnica e precisa, as operações relativas à construção; e produzir de modo menos artesanal e mais industrializado, continuando, todos eles, absolutamente vigentes nos dias atuais, na época pós-digital na qual nos encontramos. As ferramentas digitais colaboram na realização de todos esses objetivos, mais do que qualquer outra ferramenta tradicional — conceitual ou mecânica —, razão pela qual não deveria haver nenhuma contradição em se conceber uma Geometria Descritiva a partir de ferramentas digitais.

O uso das ferramentas de controle do espaço e o estudo da Geometria a partir do pensamento gráfico

Vem-se confundido e misturando o ensino do manuseio de ferramentas com o estudo das habilidades mentais que conduzem aos fins arquitetônicos, nos quais a Geometria, por meio do pensamento gráfico, impõe seu protagonismo. Essa confusão não é uma questão nova, vem de muito tempo e já estava presente no ensino dos Sistemas de Representação tradicionais, destinados ao estudo da Geometria. Segundo Ricardo Migliari: “Descriptive geometry has this capability too [representation], but it is only one among several. Indeed, descriptive geometry is, first of all, the science that teaches to construct shapes of three dimensions, by means of a graphic solution that simultaneously controls the metric, formal and perceptive aspects” (2012:568).

Os Sistemas de Representação são as ferramentas de visualização e os recursos gráficos com que se contou, tradicionalmente, para definir, representar e controlar a posição dos objetos no espaço. Como ferramentas que são, podemos conhecer perfeitamente o seu manuseio sem saber nada a respeito de sua aplicação em geometria, arquitetura ou engenharia. Podemos saber usar perfeitamente o Sistema Diédrico, ignorando, em seguida, o que fazer com ele, ou suas qualidades ou limitações no estudo de tal ou tal superfície geométrica.

A Geometria — aplicada ao estudo da Arquitetura e Engenharia — aborda e aprofunda as propriedades dos objetos, no tocante à sua forma (formas geométricas), sua classificação e as relações entre elas. A Geometria busca desenvolver axiomas, princípios e teoremas, como o “Teorema de Dandelin”, que relaciona o cone de revolução, a esfera inscrita tangente a um plano de corte, com o foco da seção cônica; ou os “Teoremas de Interseção de Quádricas”, etc. Pode-se enfocar o estudo da geometria a partir da álgebra, da expressão gráfica (pensamento gráfico), etc., e sua profundidade e grandeza estão acima de qualquer sistema de representação. É território comum de muitas disciplinas, entre elas, a arquitetura. Atualmente, dá-se o nome de Geometria Arquitetônica ou *Architectural Geometry* a esses saberes geométricos (matemáticos, gráficos, programação algorítmica, etc.) que estão a serviço da Arquitetura.

Se falamos, para estudar Geometria, apenas de pensamento gráfico (não matemático, nem algébrico, nem algorítmico), com auxílio de ferramentas de controle gráfico (digamos, “meios de controle gráfico”), falamos, então, de Geometria Descritiva. Esta disciplina histórica permitiu ensinar, nas Escolas de Arquitetura, alguns sólidos fundamentos geométricos e uma gramática básica que opera com raciocínios simples (a partir da máxima abstração do ponto e da linha), que podem ser extrapolados para corpos e superfícies geométricas mais sofisticadas, por meio de uma sequência lógica.

No entanto, de forma contraditória, à medida que foi aumentando o número de ferramentas digitais de controle do espaço, foram sendo esquecidos, também, os fundamentos geométricos para lidar com qualquer tipo de raciocínio de certa complexidade. Um olhar sobre a situação atual evidencia as grandes carências em “fundamentos da geometria” nas quais se encontram os estudantes das Escolas de Arquitetura (na Espanha), não só nos cursos iniciais de formação, como também, de forma mais preocupante, nos mais avançados. Ao passo que se produziu essa situação de desconhecimento básico no currículo acadêmico, foram se proliferando toda uma série de cursos de softwares avançados, para estudantes que, embora bem formados no tocante às ferramentas informáticas, careciam de fundamentos geométricos mais gerais para conduzi-las.

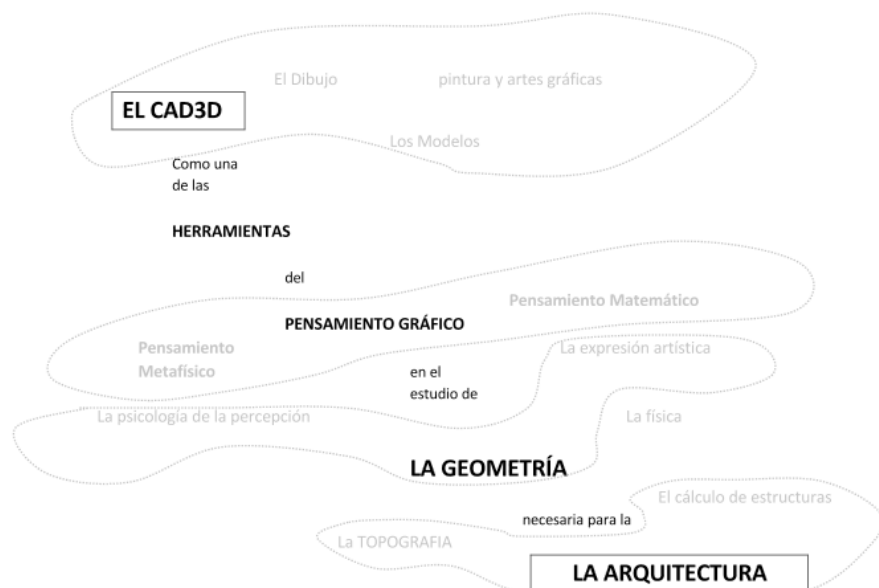
A Geometria Descritiva tradicional — a dos nossos tratados e manuais —, de forma coerente com o sistema de representação de sua época, contribuiu muito para a sistematização dos “fundamentos da geometria”, e tal material continua sendo um referente válido, para ser reinterpretado e abordado à luz das ferramentas digitais. Existem agora melhores ferramentas para controlar, a partir do pensamento gráfico, a geometria subjacente na arquitetura, mas ainda resta construir um “corpus” estruturado onde os fundamentos estejam dispostos de modo sistematizado, para o seu ensino a partir de ferramentas digitais. Talvez, nosso maior desafio como professores de Geometria Descritiva aplicada à Arquitetura e à Engenharia.

A geometria que é necessária à Arquitetura

Nos últimos quinze anos, surgiu um complexo debate sobre a conflituosa questão: que geometria é necessária, hoje, à Arquitetura? Este tema foi abordado em vários congressos de expressão gráfica (como os congressos EGA ou Apega); os de Geometria Descritiva (Aproged) e informática gráfica (como aCAADe ou Sigradi) também não ficaram alheios a esse enfoque; assim como foi um debate tratado abertamente em revistas que abordam a relação entre arquitetura e matemática, como “Nexus” (Tafteberg et al., 2014:505–516), ou revistas do âmbito da educação superior e arquitetura.

O que começou como uma crise metodológica no ensino de uma disciplina, que cada um enfrentou com seus próprios recursos e decisões — às vezes, improvisadas, diante da ausência de reflexão crítica — deu lugar, hoje em dia, a centenas de publicações científicas sobre o tema. Nós vamos tentar responder esse questionamento com base em nossa experiência docente e de pesquisa, levando em conta um enfoque metodológico próprio. Quanto ao problema referente a “que geometria se considera necessária à arquitetura”, situamo-lo ao fim de uma longa sequência de aproximação hermenêutica do fenômeno de criação e produção arquitetônica, em seu mais amplo aspecto (Fig.2). Em primeiro lugar, abordaremos as ferramentas digitais — dentro do conjunto de ferramentas de que dispomos —, destacando como se diferenciam substancialmente das tradicionais, na medida em que permitem superar o paradigma anterior.

Fig. 2. Aproximação hermenêutica do fenômeno de criação e produção de arquitetura, a partir das ferramentas, do pensamento gráfico e da geometria.



Com as ferramentas digitais, superamos o problema da representação da tridimensionalidade em suporte plano, assim como o problema da precisão nos traçados gráficos. Também dispomos de uma série de automatismos a nosso favor, que aceleram o processo de visualização e minimizam a energia mental usada nos procedimentos auxiliares intermediários, incorporando a potência de visualização da máquina à nossa mente (e à nossa imaginação, abrindo, assim, novas relações associativas).

No tocante às particularidades do que foi chamado de “pensamento gráfico”, este se diferencia de outros tipos de pensamento, como o “matemático” ou outros, pois operam, nele, a informação gráfica e os processos de construção da mesma. Estes intervem de forma ativa na construção do desenho, do modelo ou da imagem, e o estado final de tal construção gráfica — que se retroalimenta da visualização — é justamente a conclusão de dito raciocínio. É um pensamento que precisa da presença física de imagens codificadas, para que cada etapa possa continuar sendo produzida dentro do raciocínio global. A ausência de tais imagens ou um erro na codificação das mesmas impediria, pelo contrário, o fluxo das ideias. Sobretudo, trata-se de um pensamento não verbal, flui por outras vias; as tentativas de explicar esse raciocínio a partir do verbal e sem ajuda de elementos gráficos mostram-se inviáveis.

Aprofundando-nos na última parte do processo ilustrado na figura 2, abordamos a relação que se produz entre a geometria e a arquitetura. Mas levando em conta tudo o que foi dito anteriormente, a pergunta completa seria: que geometria parece-nos necessário dominar para seu uso na arquitetura, considerando que vamos abordá-la a partir do pensamento gráfico e com as ferramentas digitais da nossa época?

Responderemos a pergunta da mesma forma que era respondida em seus inícios fundacionais, no século XIX: “aquela que aborda, a partir do pensamento gráfico, os problemas concretos da arquitetura; ajuda a controlar, de forma absolutamente técnica e precisa, as operações relativas à construção e serve para produzir de modo menos artesanal e mais industrializado [mais eficiente]”.

Os “fundamentos da geometria” constituem a gramática que nos permite realizar raciocínios geométricos mais elevados, que servem, finalmente, para articular problemas e soluções concretas na arquitetura. Fazer uso dessa capacidade e desenvolvê-la para fins práticos é o objetivo último do ensino da Geometria Descritiva. Nós sintetizamos cinco fases do processo arquitetônico onde o conhecimento da geometria está fortemente presente. Estas fases estão bastante relacionadas com a pré-fabricação e, talvez, os Laboratórios de Fabricação Digital — Fablabs — sejam os cenários mais apropriados para vincular todas as fases desse processo no âmbito docente e de pesquisa:

“Geometria e criatividade”. Falamos da ideia geométrica do projeto. Na tradição do desenho arquitetônico, poderia ser relacionado ao croqui. Em desenho paramétrico, fala-se do algoritmo gerador da forma.

“Geometria, definição gráfica e controle da forma”. O desenho de criação, ou o modelo 3D, como substituto do objeto, que poderia estar relacionado à definição exigida por um projeto básico. Há todo um conhecimento geométrico colocado ao serviço dessa definição formal.

“Geometria de precisão e detalhes”. A definição geométrica de cada uma das partes de um objeto arquitetônico e as relações de junção ou combinação das partes entre si. Trata-se de um nível de precisão necessário à criação de uma axonométrica ou à criação de um pré-fabricado.

“Geometria, medições e avaliação econômica”. A geometria como ferramenta de medição.

“Geometria, construção e montagem”. É a geometria necessária à definição gráfica dos sistemas de montagem, aquela que explica os processos de combinação e a Geometria dos sistemas de controle.

Nesse sentido, o desafio é planificar essas cinco fases por meio de um projeto docente e dispor de um ambiente de trabalho apropriado para colocá-lo em prática. Como já adiantamos, nossa proposta consistirá em abordar, a partir da Geometria Descritiva —e usando ferramentas digitais —, as fases de desenho, fabricação digital e montagem colaborativa de um pavilhão de madeira. Esta experiência é aproveitada como uma oportunidade de aplicar um modelo teórico e como validação do mesmo.

A importância dos “fundamentos da geometria” na era pós-digital. A pesquisa geométrica

Abordar um projeto dessa natureza nos obriga a um estudo triplo: abordar os “fundamentos da geometria”, os “fundamentos do software” e os “fundamentos da fabricação digital”. Não se trata apenas de um exercício de Geometria aplicado a um processo construtivo. Para cumprir os objetivos, a rede de conhecimentos, aptidões e habilidades precisa ganhar em complexidade, assumindo as competências conceituais (teoria e fundamentos), instrumentais (ferramentas de desenho) e produtivas (ferramentas de fabricação).

Ao relacionarmos as cinco fases anteriormente comentadas aos processos básicos de fabricação digital, observamos que coincidem, basicamente, com os processos de “desenho”, “fabricação” e “montagem” que encontramos na fabricação industrializada. Cada um desses processos pode ser concebido por equipes totalmente autônomas, mantendo uma estreita semelhança com os processos de desenho industrial. A experiência de desenho, fabricação e montagem de um pavilhão, a partir de fundamentos geométricos, transforma-se, também, num exercício de comunicação e coordenação intergrupal, onde os estudantes podem trabalhar competências necessárias ao trabalho em equipe.

Não podemos esquecer outros aspectos importantes que são incorporados a esse modo de trabalho, nomeadamente, conceber a ferramenta digital como um laboratório de pesquisa geométrica, onde se investiga, de forma empírica, as propriedades geométricas e estruturais de certas superfícies, que vamos pôr em prática no projeto. Desta forma, acrescenta-se ao questionamento inicial uma variável, que transcende a pura docência, transformando a experiência num ateliê experimental de pesquisa (Casale, 2015).

Até a presente data, desenvolvemos diferentes pesquisas no âmbito das superfícies geométricas, com auxílio de tecnologias digitais, iniciando o percurso pelos “Teoremas de Quádricas”, que colocamos em prática nas instalações “The Caterpillar Gallery”, na Universidade de Sevilha (Narváez e Martín-Pastor 2014:309), e “The Cocoon”, na Universidade Nacional da Colômbia (Martín-Pastor et al., 2014). Abordamos, também, o estudo das superfícies desenvolvíveis, especificamente, as superfícies com mesmo grau de inclinação, com o pavilhão “SSFS Pavilion - Sante Fe” (Sigradi 2016), além de uma adaptação melhorada do mesmo desenho, com o pavilhão construído em Sevilha para o evento de “La noche Europea de los Investigadores”. Em nosso último ateliê, desenvolvemos as superfícies helicoidais desenvolvíveis e seu uso na construção de pavilhões de madeira, com o Butterfly Gallery – Helicoidal Surfaces, na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Butterfly Gallery - Helicoidal Surfaces. Estratégias geométricas para a fabricação digital

O ateliê intitulou-se: “Butterfly Gallery - Helicoidal Surfaces, Estratégias Geométricas para a Fabricação Digital”, e foi ministrado como atividade da pesquisa “A Educação do Olhar: apreensão dos atributos geométricos da forma dos lugares”, no Programa de Pós-graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio de Janeiro - Proarq, durante o mês de agosto de 2015. Minha participação resultou do generoso convite da professora Maria Angela Dias, coordenadora do mesmo. A atividade contou, também, com o apoio dos professores Andrés Martín Passaro, Gonçalo Castro Henriques, Danusa Gani, Mauro Chiarella e Raphael Marconi, entre muitos outros da FAU-UFRJ, assim como da equipe da Lamo3D, além da colaboração do Fablab Sevilla.

A estratégia docente do workshop estabeleceu um percurso para um grupo de estudantes de Arquitetura, por meio de um programa teórico-prático de duas semanas. Durante elas, foram abordadas as competências de “fundamentos da geometria”, assim como as competências de uso e manuseio das ferramentas digitais, a partir de leis de geração geométrica, e a capacidade exploratória da forma, graças a algoritmos paramétricos. Estes foram colocados em prática num pequeno ateliê de experimentação projetual, onde cada grupo de estudantes elaborou seu próprio projeto de pavilhão. Por fim, um exercício guiado contemplou os aspectos construtivos e as competências em fabricação digital, concluindo-se com a construção física do pavilhão intitulado: The Butterfly Gallery – Helicoidal Surface.

Nos primeiros dias do workshop, foram trabalhadas questões teóricas, os fundamentos geométricos que devem ser conhecidos para se trabalhar com superfícies desenvolvíveis e com a geometria do helicóide. Os parâmetros que determinam a forma da hélice da qual deriva: o passo, o raio da hélice, etc., e as condições da família de retas que, apoiando-se nela, geram um helicóide desenvolvível (Fig.3). Todas essas lógicas foram trabalhadas, primeiramente, como uma sequência de operações gráficas desenhadas por meio do software *Rhinceros*, que foram, depois, transferidas à forma de algoritmo no *Grasshopper*, como se fossem uma transcrição literal dos mesmos raciocínios geométricos.

Fig. 3. Representação gráfica e parametrização de uma hélice a partir das variáveis “eixo”, “passo” e “raio”. Representação do helicóide desenvolvível que se apoia nela.



É difícil passar da lógica gráfica do programa de CAD à programação paramétrica quando se dispõe de uns poucos dias para tal, além de alguns estudantes — muitos dentre eles — terem se encontrado com esse recurso pela primeira vez. Contudo, a chave para o sucesso do ateliê residiu em termos entendido que é a lógica do pensamento gráfico, unida ao conhecimento geométrico, que estrutura a programação algorítmica, e não o contrário (programar sem pensamento gráfico prévio seria como desenhar “de memória” e “no escuro”). O algoritmo resultante permite gerar um helicóide desenvolvível, com suas diferentes variáveis formais perfeitamente parametrizadas. A grande contribuição do desenho paramétrico é permitir construir não apenas um desenho (uma solução), mas também uma família inteira de soluções, que compartilha da mesma lei de geração geométrica inicial.

Na parte de experimentação da forma, os alunos puderam explorar essa superfície para seus próprios fins de composição e projeto. A construção do algoritmo formou parte da própria criação arquitetônica, no sentido em que se desenhou uma ferramenta “na medida”, que nos permitiu explorar e manipular a forma geométrica de acordo com nossos objetivos, transformando uma superfície abstrata num verdadeiro projeto (Fig. 4). Uma ferramenta que, graças ao uso de simples “fundamentos da geometria”, nos permitiu dirigir o pensamento gráfico — para além dos limites das ferramentas tradicionais — a um “pensamento gráfico avançado”.

Fig. 4. A professora Maria Angela, revendo cada projeto. Trabalhos realizados pelos estudantes do workshop.



A geometria de superfícies desenvolvíveis permite que cada uma das superfícies helicoidais que formam o pavilhão possa ser desenvolvida, no plano, numa única lâmina de madeira. Com a ajuda da equipe de montagem, a superfície se curva com o frio, adquirindo uma forma helicoidal no espaço. Cada uma dessas superfícies é um fragmento de helicóide diferente, para atar ou costurar entre si, por meio de lacres de nylon, a fim de que o conjunto adquira rigidez.

Uma vez definido o projeto básico comum a ser desenvolvido por todos os participantes do workshop, passamos a definir geometricamente cada um dos componentes do pavilhão (poderíamos dizer o projeto de execução). Para isto, foi fundamental conhe-

cer as dimensões padronizadas dos painéis de madeira da indústria local, bem como as características físico-mecânicas da madeira, o seu raio mínimo de curvatura, as dimensões de parafusos e porcas para prender, a tipologia dos mesmos, diâmetros de arruelas, etc., e manter todos esses aspectos sob controle antes do processo de axonometria do pavilhão, que é um processo geométrico de grande complexidade, onde se evidencia uma série de competências de Geometria Descritiva.

A superfície contínua de cada um dos anéis helicoidais transformou-se num conjunto de peças a serem mecanizadas com fresadora CNC, que seriam solapadas e mecanizadas com todas as perfurações necessárias para parafusos e lacres de nylon. Por outro lado, a fixação à plataforma horizontal onde repousaria o pavilhão foi realizada por meio de suportes de madeira de 3 cm, todos diferentes, que se adaptam perfeitamente à geometria da superfície em seu encontro com ela. Toda essas informações geométricas passariam a formar parte dos arquivos de corte necessários à fabricação digital. (Fig.5).

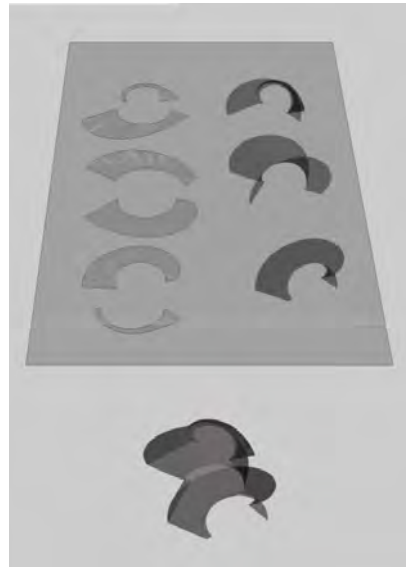


Fig. 5. Modelo Rhino do Pavilhão, onde podemos ver o desenvolvimento plano de cada um dos anéis.



Fig. 6. Simulação da construção do pavilhão a partir de uma maquete em escala 1:8, onde se reúne todos os componentes.

Quando ficaram definidos os diferentes componentes do pavilhão, passou-se à construção de um simulacro do mesmo, com uma maquete em escala 1:8, onde foram realizadas os testes de verificação de cada uma das peças e da estabilidade geral do conjunto, além dos testes de simulação e coordenação dos processos de montagem (Fig.6). Uma vez realizadas, abriu-se caminho para a fabricação de todos os componentes em escala 1:1, terminando-se a fase de desenho e iniciando-se a fase de produção, no nosso caso, executada por membros da Lamo3D, com a colaboração da Foco Design.

A montagem do pavilhão foi uma das fases mais emblemáticas do processo, em razão da alta carga emocional que teve a finalização de um trabalho coordenado e colaborativo dessa natureza (Fig.7). No entanto, não podemos esquecer que se tratou, também, de um trabalho de precisão, onde tivemos que prever certas tolerâncias nos ajustes

fnais e situações conflituosas no processo. Otimizar o rendimento, com uma divisão igualitária do trabalho, de acordo com as ferramentas de que se dispõe (parafusadeiras elétricas, etc.), foi uma das chaves do sucesso nessa fase de montagem.

Fig. 7. Montagem do Pavilhão em escala 1:1. FAU, Universidade Federal do Rio de Janeiro.



À guisa de conclusão

Dentre os objetivos docentes, era prioritário produzir um vínculo entre os conhecimentos de “fundamentos da geometria” e sua aplicação à arquitetura real. Neste sentido, o ateliê foi um sucesso, tanto se o avaliarmos em cada parte quanto pelo resultado arquitetônico final: o Butterfly Gallery. Abrangemos quase todas as fases da relação entre geometria e processo arquitetônico. Dentre elas, adquiriram especial relevância as de “geometria e criatividade”, “geometria, definição gráfica e controle da forma” e — tanto quanto possível no tempo que tivemos — “geometria de precisão e detalhes”.

Os três processos produtivos associados à geometria e à fabricação digital, a saber, o “processo de desenho”, o “processo de fabricação” e o “processo de montagem”, ficaram claramente expostos durante o workshop e acreditamos ter sido acertado delegar as tarefas do “processo de produção” à equipe da Lamo3D, para concentrar-nos, com os estudantes, nas fases inicial e final (desenho e montagem), deixando constar expressamente que se tratavam de três processos delegáveis a três grupos de trabalho diferentes.

No tocante ao desenvolvimento do ateliê, acreditamos que foi fundamental a intrínseca motivação de que dispunham os alunos e a equipe de professores colaboradores. O sucesso da experiência dependeu em grande parte disso, bem como da capacidade de dinamização, coordenação entre equipes, experiência prévia, controle e medição de tempos e esforços, etc., de que dispunham todos os membros da equipe. Por todos esses motivos, acreditamos ter sido um modelo exemplar de experiência de inovação docente.

Nas questões relativas à pesquisa, o ateliê foi um laboratório de experimentação prática e teórica. Evidenciou-se a forma como, por meio de ferramentas digitais, podemos

redescobrir superfícies geométricas pouco utilizadas na arquitetura — embora presentes nos tratados e manuais de geometria — e dar-lhes um novo uso na produção arquitetônica atual.

Avançou-se na parametrização de uma família de superfícies — os helicoides desenvolvíveis — por meio da ferramenta *Grasshopper*, sendo que essas superfícies são extremamente complexas de desenvolver com recursos CAD3D convencionais (inclusive *Rhinoceros*) e praticamente impossíveis com os tradicionais. Com isto, avançou-se no estudo e na aplicação de superfícies desenvolvíveis à Arquitetura, deixando a porta aberta para todo um universo de exploração formal através dessas tecnologias. Avançou-se, também, nos aspectos construtivos e de montagem de arquitetura efêmera — concretamente, a arquitetura de pavilhões de madeira —, com características genuínas de junção (com parafusos e solapamentos) e fixação (mediante costura com lacres de nylon), de fácil montagem, que já haviam sido testadas em nossos pavilhões anteriores e que, nessa experiência, foram aperfeiçoadas.

Agradecimentos

Agradeço à professora Maria Angela Dias, que, com sua vontade, tornou esse ateliê realidade; a Juan Expósito pelo desenho conjunto do *Butterfly_Gallery*; aos professores Andres Martin Passaro, Gonçalo Castro Henriques e aos rapazes da LAMO, artífices da produção e do sucesso do workshop; à equipe FABLAB Sevilla; à professora Danusa Chini Gani, a Raphael Marconi, a Mauro Chiarella e aos demais professores da UFRJ, pela ajuda constante; a todos os alunos que participaram do ateliê, sem o esforços dos quais a experiência não teria sido possível; e, por fim, com afeto, à professora Gabriella Celani, a pessoa que acendeu o fogo ao me apresentar Maria Angela em Montevideo, em novembro de 2014.

Referências

CASALE, Andrea; et al. Surfaces: Concept, Design, Parametric Modeling and Prototyping. *Nexus Network Journal* 15, vol. 2 (2013), p. 271-283.

GENTIL BALDRICH, José María. Sobre arquitectura y ciencia: la introducción de la Geometría Descritiva en España. Em: *Cuadernos de Construcción*, vol. 4, Sevilla, 1983, p. 41-56.

CHIARELLA, Mauro; GARCÍA-ALVARADO, Rodrigo. Folded Compositions in Architecture: Spatial Properties and Materials. *Nexus Network Journal* 17, vol. 2 (2015), p. 623-639.

KUHN, Tomas S. *La estructura de las revoluciones científicas*. Chicago: Chicago Press, 1962 [primeira edição].

MARTIN-PASTOR, Andrés; TORRES-HOLGUIN, Jorge; NARVAEZ-RODRIGUEZ, Roberto; GALINDO-DIAZ, Jorge. Los workshops de geometría en Cad3D y prefabricación digital como estrategia docente en la enseñanza de la geometría para la arquitectura. Em: *Proceedings of the XVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics*. [Blucher Design Proceedings, v.1, n.8.] São Paulo: Blucher, 2014, p. 213-216.

MIGLIARI, Riccardo. Descriptive Geometry: From its Past to its Future. *Nexus Network Journal* 14, vol. 3, (2012), p. 555-571.

MONGE, Gaspard. *Géométrie descriptive*. Paris: Baudouin, 1798.

NARVÁEZ-RODRÍGUEZ, Roberto; MARTÍN-PASTOR, Andrés; AGUILAR-ALEJANDRE, María. The Caterpillar Gallery: Quadratic Surface Theorems, Parametric Design and Digital Fabrication. Em: *Advances in Architectural Geometry 2014*, eds. Philippe Block et al. Londres: Springer (2014), p. 309-322.

POTTMANN, Helmut. Architectural Geometry and Fabrication-Aware Design. *Nexus Network Journal* 15, vol. 2 (2013), p. 195-208.

POTTMANN, Helmut; ASPERL, Andreas; HOFER, Michael; KILIAN Axel. *Architectural Geometry*. Exton: Bentley Institute Press, 2007.

SACAROVITCH, Joël. Épures d'architecture. De la Coupe de pierres à la géométrie descriptive, XVIIe-XIXe siècles. Em: *Science Network. Historical Studies* vol. 21. Basileia; Boston; Berlim: Birkhäuser, 1998.

TAFTEBERG JAKOBSEN, Ivan; MATTHIASSEN, Jesper. Descriptive Geometry and/or Computer Technology? What Mathematics is required for Doing and Understanding Architecture? *Nexus Network Journal* 16, vol. 2 (2014), p. 505–516.