

# Curve folding in form generation with digital fabrication

Patricia Laura Muñoz

Universidad de Buenos Aires, CaBA, Argentina  
patricia.munoz@fadu.uba.ar

**Abstract.** The combination of traditional morphological knowledge with digital manufacturing possibilities is fundamental for Design. Understanding how to create unthinkable shapes, when old boundaries are removed, opens generative possibilities for everyday objects. On the other hand, pre-digital knowledge provides conceptual resources to organize this new possibility. This interaction allows critical appropriation to take place. This research aims to incorporate curved folding through laser cutting as a tool to generate new forms, considering the value of pre-digital knowledge and of the benefits of digital fabrication in this area, compared to traditional cutting dies. The analysis of geometric aspects was the initial activity, defining the design variables for two kinds of patterns. Later different laminar materials were tested to determine the advantages and obstacles in each case. Finally, some of the results were implemented in products and verified in instructional activities with Industrial Design undergraduate students.

**Keywords:** Digital Craft, Morphology, Design, Curve-folding, Materials

## 1 Introducción

Cuando existe un extenso desarrollo de posibilidades tecnológicas, es fundamental elegir atendiendo a las necesidades locales, con una mirada global. A lo largo de los años, nos hemos apropiado de distintos recursos provenientes de los medios digitales. Al enseñar e investigar en una universidad pública, los fondos siempre han sido limitados. Esta restricción fomentó la diversidad, tanto de plataformas y programas que empleamos, como de usos híbridos analógico-digitales. Entendemos también que no se trata de descartar los conocimientos previos, sino de capitalizarlos y reformularlos o ampliarlos a la luz de los avances que permiten nuevas exploraciones.

Como una manera de ejemplificar este modo de trabajo, nos referiremos la investigación sobre plegado curvo en objetos. Esta tecnología ya estaba

disponible con procesos tradicionales (troquelado y corte). Sin embargo la dificultad de la construcción de los troqueles limitaba las formas posibles, y su costo requería una cantidad significativa de repeticiones para que fuera viable económicamente. El marcado o el corte discontinuo con corte láser habilitó un gran número de experimentaciones que extendieron los límites de la incorporación de este sistema generativo a las formas de los objetos cotidianos, incorporando también la complejidad de los pliegues curvos como una variable más de diseño. En este proyecto se revisaron los desarrollos teóricos previos para diseñar exploraciones con el propósito de identificar las variables de transformación y su potencia configurativa para contribuir a la elaboración de la forma de los objetos de uso. Asimismo, se exploraron diferentes materiales para detectar la potencialidad y su aporte como recurso de diseño.

### 1.1 Los antecedentes

Uno de los orígenes del plegado curvo puede rastrearse al doblado de servilletas del siglo XVII (Demaine et al, 2008; Koschitz, 2014, p.41), como se aprecia en *Li Tri Trattatti*, de Messer Mattia Giegher (1639). Siglos después, con una mirada centrada en la exploración de la forma y la materia, Josef Albers introduce esta temática en los cursos de la Bauhaus de 1927 y 1928. Algunas producciones de sus estudiantes fueron el origen de distintas investigaciones. Una historia pormenorizada de este recorrido se encuentra en Koschitz (2014) que, si bien centró su tesis en la obra de Huffman, realiza un atento relevamiento de los antecedentes del plegado curvo. Desde un punto de vista morfogenerativo se considera de particular interés el trabajo de Huffman, Resch, Demaine, Mitani y Sweeney. A lo largo de los años, desde la producción de diseño industrial, se ha empleado en envases, muebles y diversos productos en distintos materiales como cartulina, plástico y metal. Un caso paradigmático es el del sistema de lámparas creado por Poul Christiansen y fabricado por la empresa Le Klint (s.f) desde 1971 en láminas plásticas. Estos objetos muestran la complejidad formal que puede lograrse a partir de una lámina rectangular por medio de simples plegados curvos. Productos tan disímiles como cubiertos descartables de Sam Sannia Design (s.f.) del 2007; el equipamiento Flux de 2009 ([fluxfurniture.com](http://fluxfurniture.com)), el bote plegable de Maarmo Design de 2011 (Etherington, 2011), o la instalación Arum de Zaha Hadid (s.f.) de 2012; evidencian la diversidad de usos, escalas y materiales que aprovechan esta estrategia morfogenerativa.

Es notable el aporte de los medios digitales en estos casos en un rol doble. Una valiosa contribución es en la generación y determinación de formas, en particular aquellas concretadas por módulos diferentes, que dan cuenta de las transformaciones. El otro rol se vincula a sus aspectos productivos: desde el corte láser o por agua en materiales tan diversos como papel y metal, la disposición de placas para el aprovechamiento del material y la identificación

de piezas distintas por grabado, hasta el plegado de metal por robots, entre otras contribuciones.

## 2 Metodología

En el marco del proyecto UBACyT 20020130200091BA, *Morfología y medios digitales: nuevas posibilidades morfo generativas y de fabricación*, se estudiaron las alternativas para la producción de formas por medio de plegado curvo, en principio en instancias pre-digitales, para producir una conceptualización de estas técnicas desde sus posibilidades morfo-generativas. Con el propósito de delimitar el objeto de estudio nos centramos en los diagramas que consisten en bandas, con pliegues paralelos al lado corto y los radiales, con simetría en su mayor parte y sin costura. Se dejaron de lado las tramas por plegado curvo (Koschitz, 2014) y los plisados por líneas concéntricas cerradas (ampliamente desarrolladas por Demaine et al, 2009, y Caigui et al, 2019 entre otros). También excluimos los plegados con tensión del material curvado y por asociaciones de fragmentos de superficies reflejadas. Estas categorías podrían abordarse en otra instancia. Se seleccionaron dos grupos de patrones, y se produjeron diversas experiencias para definir sus variables. En principio se trabajó a mano y luego se empleó corte láser en diferentes materiales laminares, para explorar los aportes y limitaciones que cada uno brindaba. La conceptualización y su implementación apuntaba al uso del plegado curvo como un recurso más en la generación de formas para el diseño industrial.

## 3 La investigación

La indagación atravesó diferentes etapas: una vinculada mayormente a la comprensión de las variables de transformación de algunos patrones existentes, otra relacionada con el empleo de diferentes materiales y su implementación en productos.

### 3.1 Análisis de las configuraciones

Para entender la relación entre las formas planas y sus correlatos tridimensionales se desarrollaron diferentes modificaciones de los patrones de plegado seleccionados, verificando su influencia en el modelo 3D. Esto puede verse en un diagrama de bandas y en el desarrollo del pasante de investigación Bruno Lai sobre el patrón Bud, (<https://theiff.org/oexhibits/paper04.html> de la Dra. Jeannine Mosely), en la Figura 1.

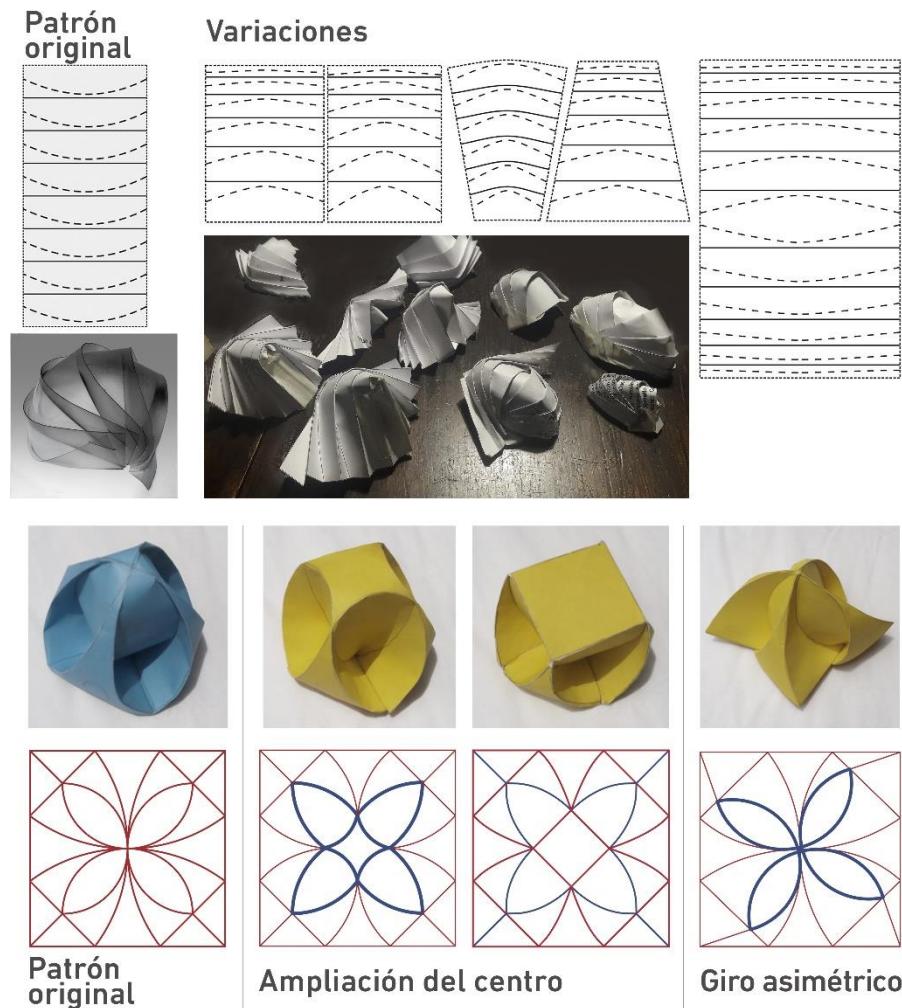


Figura 1. Diagrama original (bandas y radial) y variaciones Fuente: Muñoz, 2018

### 3.2 Exploraciones empleando corte láser y diferentes materiales

Una vez detectadas las principales variables de diseño y la relación entre el 2D y el 3D, se incorporó al corte láser como herramienta de exploración para incluir diferentes materiales laminares. Cabe aclarar que el Laboratorio de Morfología no cuenta con máquinas de corte láser propias, por esto se trabajó con proveedores externos. En todos los casos, ellos tenían una amplia experiencia en el uso de los equipos y no hubo problema en las soluciones técnicas.

La primera experimentación fue con polipropileno, ya que aportaba la posibilidad de incorporar la variable de transparencia, translucencia y opacidad. Esta última se lograba por superposición de material como puede verse en el sector superior de la Figura 2. Otro aspecto significativo para esta elección fue la resistencia al plegado reiterado que tiene este material. Su baja tasa de fatiga permite doblar las piezas muchas veces sin que se agrieten o rompan. En el sector inferior de la Figura 2 se aprecia cómo el punteado no presentó problemas en la superficie y también algunos modos de unión que desarrollamos a partir de las propuestas de Clement Zheng (<https://clementzheng.github.io/joinery/>). Si bien el software es para uniones entre rectas, puede adaptarse a configuraciones curvas. Al ser un material muy resistente, se utilizó esta característica para generar las trabas para mantener la pieza en 3D.

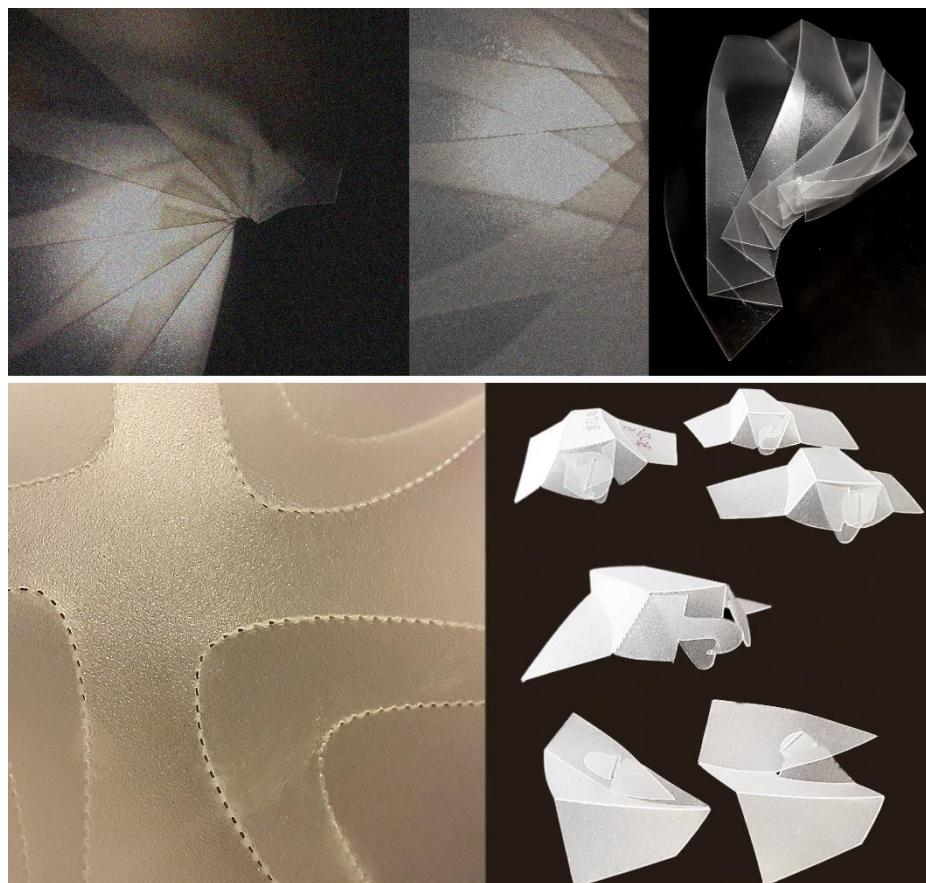


Figura 2. Traslucencia por superposición en polipropileno. Detalle del punteado con láser y estudio de uniones. Fuente: Muñoz, 2017.

Estas experiencias se trasladaron al diseño de un cloche para un concurso internacional de cocina, Bocuse D'Or, que presentamos en Homo Faber 2.0 (IEHU, 2018, pp.66-67). Las piezas finales se fabricaron en polipropileno, pero se realizaron exploraciones muy interesantes con el film de las pantallas led que distorsionan la imagen. No la empleamos porque era muy sensible al quemado, que era inaceptable para el producto. Sin embargo en la Figura 3 se destaca su potencial para otros usos.



Figura 3. Prueba del cloche en film con propiedades ópticas. Fuente: Muñoz, 2017

Luego, se emplearon cuero y cuerina (o cuero sintético) con un grupo de pasantes de investigación: Leila Linares, Estefanía González Oliva, Santiago Alvarez Troya y Rocío Hochbaum. En estas dos instancias, la flexibilidad del material, permitió trabajar con curvados o plegados suavizados. Hay un concepto interesante de Soft folding (Zhu et al.,2013). Si bien es un trabajo diferente, los autores explican la posibilidad de regular la intensidad del plegado, en su caso por la intervención de un software, pero también plantean que ese resultado puede lograrse a través del material utilizado.



Figura 4. Algunos resultados de la exploración con cuero y cuerina. Fuente: Muñoz, 2019

En nuestra exploración, a partir de uno de los modelos tradicionales de plegado de bandas, realizamos pruebas alternando líneas punteadas y continuas de corte para flexibilizar el material. Las segundas permitieron un curvado más regular. Asimismo, elaboramos una muestra con cuerina de mayor espesor, con un trazado de curvas que alternaban su concavidad y convexidad, dando como resultado el suavizado de los pliegues (Figura 4).



Figura 5. Exploraciones en cuero reconstituido e individual empleando los resultados de la investigación. Fuente: Muñoz, 2019

Otra experimentación empleó cuero reconstituido (Cueroflex-  
<https://www.cooperativacueroflex.com.ar/#bondedleather>). Es un material

aglomerado que contiene 80% de fibras de cuero obtenido de las curtiembres, evocando al cuero natural. Es más rígido que los materiales explorados previamente, que aporta la incorporación de la diferencia de color de sus caras y del espesor como una variable de diseño. Es más quebradizo que el polipropileno, pero flexiona bien al debilitar las zonas de plegado por trazado. Se realizaron pruebas por punteado y se desarrolló un corte con curvas y contracurvas que colaboraron para liberar las tensiones en curvas más cerradas, al estilo que Industrial Origami emplea en metal para el plegado recto (Chino, 2010). Esto también permite generar líneas de plegado curvo discontinuas, como se aprecia en la Figura 5.

En el proyecto de investigación, Analía Sequeira aplicó el plegado curvo en cueroflex, a través de una línea de trazado continuo, para la realización de una ayuda técnica para pacientes que requieren fijar el plato por problemas de motricidad. Este individual podía integrarse a los otros elementos de comida de quienes compartían la mesa sin marcar una diferencia ligada a la discapacidad. (Figura 5).

#### 4 La transferencia a la enseñanza

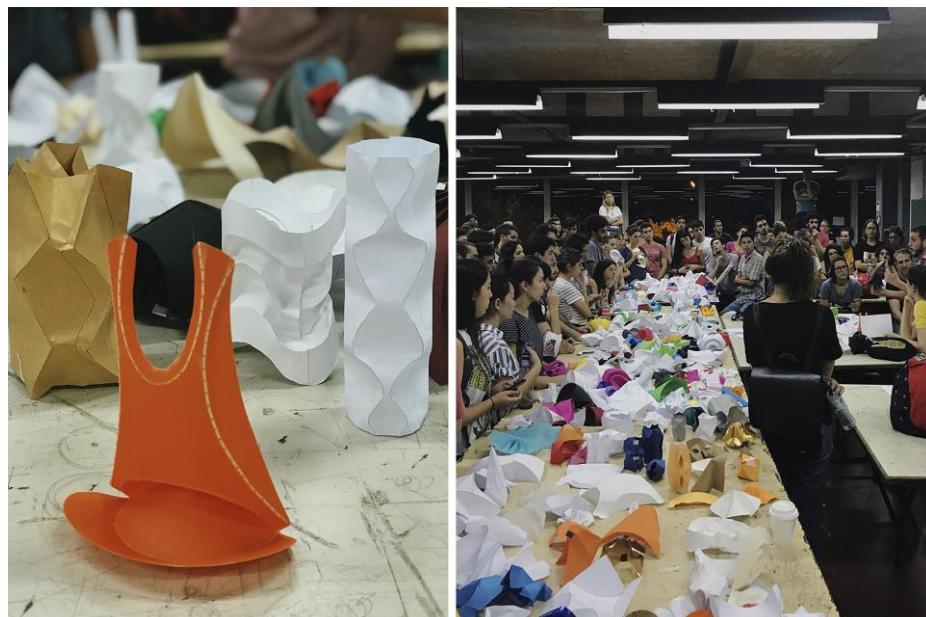


Figura 6. Imágenes del taller durante el desarrollo. Fuente: Muñoz, 2019

La transferencia de los resultados de la investigación se realizó también en la enseñanza. El plegado curvo se incorporó como tema de la asignatura

Morfología 2, Carrera de Diseño Industrial, FADU, Universidad de Buenos Aires, Argentina, en el curso 2018. Acordamos con Pendelbury, (1998, p.99) cuando plantea: La práctica es mutable porque cambia con el tiempo y presenta nuevas configuraciones que no pueden ser desconocidas si pretendemos que nuestros raciocinios sean sólidos. Contribuyendo a estos cambios, es que incorporamos estos nuevos abordajes. Se analizaron las estrategias didácticas propuestas por Koschitz (2014) y se adaptaron a los objetivos del curso.

La práctica involucró ciento ochenta estudiantes organizados en ocho grupos docentes con actividades individuales y grupales. Se alternaron actividades experimentales y analíticas. Los medios empleados por los alumnos fueron también restringidos intencionalmente. Hubo momentos de trabajo sobre maquetas de estudio en papel, otros de dibujo en croquis, otros en CAD y finalmente habilitamos el uso de impresión 3D para las maquetas finales (Figura 6). La duración de toda la práctica fue de doce clases, de cuatro horas, una vez por semana. Algunas producciones del proceso de una estudiante, Brenda Pitkowsky, se muestran en la Figura 7.

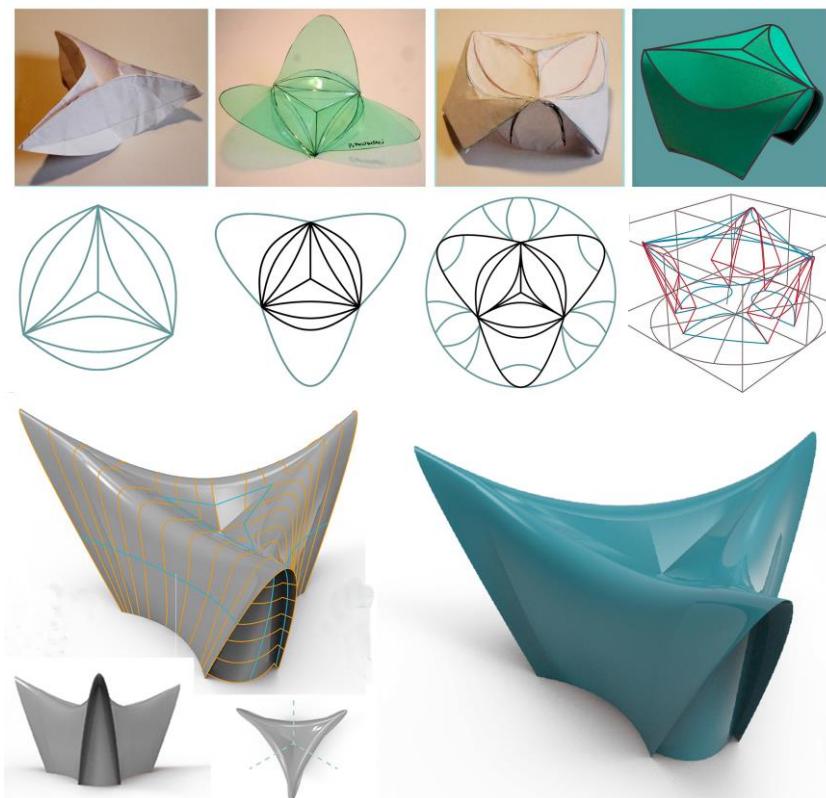


Figura 7. Parte del proceso de una estudiante, Brenda Pitkowsky. Fuente: Muñoz, 2019

Cabe aclarar que, al no existir un FABLAB en la Facultad, los estudiantes mandaban a cortar su trabajo con proveedores externos. El énfasis se puso en la posibilidad de regular la forma obtenida en la interacción entre el 2D y el 3D, comprendiendo sus lógicas generativas. El plegado curvo no fue un objetivo final sino una etapa inicial en el diseño de superficies curvas complejas.

La consigna inicial fue la de diseñar una superficie espacial curva a partir de una lámina por medio de las operaciones de corte y de plegado curvo. Se brindaron algunas estrategias que los estudiantes combinaron o modificaron para su desarrollo. En esta práctica, la forma era el resultado del trabajo sobre el material, en maquetas. No existía la prefiguración en dibujo sino que se establecía un diálogo entre las posibilidades generativas de la técnica y el material. Cada propuesta era registrada fotográficamente y organizada en una bitácora que documentaba el progreso. La evolución de las propuestas estaba directamente vinculada al saber puesto en práctica sobre la materia. La evaluación de lo producido suscitaba nuevas alternativas superadoras. Cada estudiante elaboraba su diseño pero se discutía en equipos los aspectos positivos de cada uno y se producía un intercambio muy interesante para superar los obstáculos que se encontraban. El desarrollo del estudiante Germán del Campo se observa en la Figura 8.

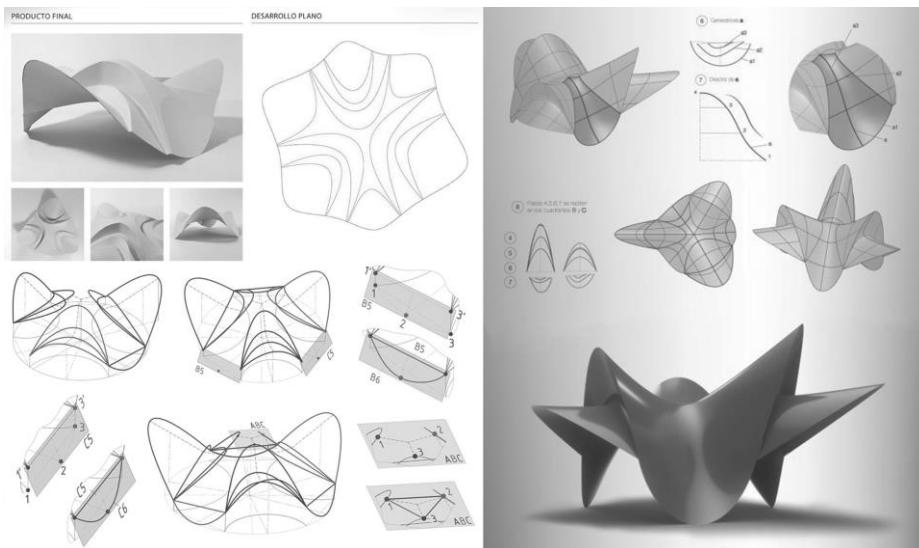


Figura 8. Parte del proceso de un estudiante, Germán del Campo. Fuente: Muñoz, 2018

Debido a la complejidad y a la generación de las formas resultantes, no se realizaron modelados tridimensionales ni dibujos 3D. Se entregaron los modelos tridimensionales y su diagrama productivo, distinguiendo líneas de corte y plegado. Se recurrió a la notación de los patrones de origami, diferenciando valles y montañas.

En una segunda instancia, se evaluaron las propuestas de cada miembro del equipo y se seleccionó una para continuar. Los estudiantes determinaron la estructura simplificada del diseño preliminar elegido para avanzar en el proyecto y explorar sus alternativas. En esta etapa fue fundamental el empleo de CAD. Cada estudiante usa el software que dispone, de modo que la intervención del docente está ligada a las herramientas proyectuales, no a las posibilidades operativas de un programa en particular.

A partir de la estructura cada equipo generó alternativas empleando conceptos de simetría y de continuidad. De esta forma, lo que parecía el producto final es solo un paso en su creación. Por lo general, las primeras propuestas en las prácticas son simétricas. Desarrollos posteriores alteran esa regularidad inicial, definiendo algunos sectores de mayor interés sobre otros y rompiendo parcialmente la uniformidad original. Otro recurso generativo empleado es la posibilidad de reducir la cantidad de caras por continuidad, enfatizando o atenuando las relaciones entre sectores de la forma de origen. Las transformaciones permiten que los estudiantes incorporen la variable identidad/ruptura de una forma, adquiriendo la capacidad de definir equivalencias y diferencias con la configuración de base que definen sus umbrales de reconocimiento.

## 5 Derivaciones y conclusiones

La posibilidad de marcar el material o de generar líneas de plegado discontinuas con láser, posibilitó la producción de objetos en bajas series y con plegados de mayor complejidad con costos viables. También permitió la exploración del empleo de diferentes materiales laminares, como el polipropileno, que incorpora la propiedad de bisagras “vivas”; o el fieltro y cuero, que brinda la posibilidad de regular las líneas de curvado. En la actualidad estamos realizando pruebas de plegado curvo en metal empleando corte láser.

Si bien existía un extenso desarrollo desde la ingeniería y la matemática, no había una clara conceptualización de este campo, en cuanto a su apertura, sus límites y sus variables para el diseño. Este conocimiento permite incorporar estas formas a la disciplina proyectual, para generar las formas que sintetizan aspectos operativos, tecnológicos y comunicacionales.

Los cambios productivos, a partir de la fabricación digital, amplían las posibilidades de concreción de formas. Sin embargo, la conceptualización morfogenerativa de las formas que habilitan permite una apropiación más potente de estos medios. Su incorporación a la enseñanza propició la verificación de los resultados obtenidos y promueve nuevas preguntas que surgen de la experimentación ampliada al vincularla a objetivos didácticos proyectuales. Así, la investigación propicia la creación de herramientas y

recursos para incorporar posibilidades tecnológicas que lo digital aporta, para sumarlas al diseño de los objetos cotidianos que conforman nuestro hábitat.

## Referencias

- Caigui Jiang, K., Mundilova, K., Rist, F., Wallner, J. y Pottmann, H. (2019). Curve-pleated Structures. *ACM Association for Computing Machinery*, Vol.38 (6), 169:1, 169:13. [https://caiguijiang.github.io/publication/2019\\_siga\\_curvepleated/](https://caiguijiang.github.io/publication/2019_siga_curvepleated/)
- Chino, M. (2010). Sheet metal origami cuts down on energy, materials Recuperado el 19 de Junio de 2022 de Inhabitat, <https://inhabitat.com/sheet-metal-origami-cuts-down-on-energy-materials/>
- Demaine, E., Demaine, M. & Koschitz, R. D (2008). Curved Crease Origami. Proceedings of Conference: Advances in Architectural Geometry (pp. 29-32) [http://theory.lcs.mit.edu/~edemaine/papers/CurvedCrease\\_AAG2008/paper.pdf](http://theory.lcs.mit.edu/~edemaine/papers/CurvedCrease_AAG2008/paper.pdf)
- Demaine, E., Demaine, M. Hart, V., Price, G. & Tachi, T. (2009). (Non)existence of Pleated Folds: How Paper Folds Between Creases. Recuperado el 19 de junio de 2022 de <https://arxiv.org/pdf/0906.4747.pdf>
- Etherington, R. (2011). Foldboat by Max Frommeli and Arno Mathies. De Zeen <https://www.dezeen.com/2011/09/29/foldboat-by-max-frommeli-and-arno-mathies/>
- Giegher, M.M. (1639). *Li tre trattati*. Gallica, bibliothèque numérique de la Bibliothèque Nationale de France. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3101729/f5.image?lang=EN>
- IEHU (2018). Curved Folding (pp.66-67). En *Homo Faber 2.0, Politics of Digital in Latin America*, Scheeren, Herrera & Sperling, Eds. <https://tinyurl.com/23p3d7m9>
- Koschitz, R.D. (2014). Computational design with curved creases: David Huffman's approach to paperfolding. MIT Libraries. <http://hdl.handle.net/1721.1/93013>
- Le Klint (s.f.). Iconic model 172 Sinus turns 50... Recuperado el 19 de Junio de 2022, de <https://www.leklint.com/en-gb/news/iconic-model-172-sinus-turns-50?Action=1&PID=820>
- Pendelbury, S. (1998). Razón y relato en la buena práctica docente. En McEwan, H. y Egan, K., *La narrativa en la enseñanza, el aprendizaje y la investigación*. (pp 86-108). Amorrortu editores.
- Sam Sannia Design (s.f.). Flat Pack. Recuperado el 19 de Junio de 2022 de <https://www.samsannia.com/works/flat-pack/>
- Zaha Hadid Architects (s.f.). Arum. Installation and exhibition by Zaha Hadid. Recuperado el 19 de Junio de 2022 de <https://www.zaha-hadid.com/2012/10/04/autumn-review-arum-installation-and-exhibition-by-zaha-hadid-architects-at-venice-architecture-biennale/>
- Zhu, L., Igarashi, T, Mitani, J. (2013). Soft Folding. *Computer Graphics Forum*, vol. 32, no. 7, 167-176